

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Скворцов Олександр Олексійович

УДК 621.9.048.4: 620.22

ДИСЕРТАЦІЯ
«ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИБОСПРЯЖЕННЯ В
АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НАНЕСЕННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ
ПОКРИТТІВ»

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Олександр СКВОРЦОВ

Науковий керівник: Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Скворцов О. О. Підвищення зносостійкості елементів трибоспряження в абразивному середовищі нанесенням композиційних покриттів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка. Державний університет «Київський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертація присвячена вивченню загальних закономірностей і мікромеханічних властивостей електроіскрових покриттів та оцінці їхнього впливу на механізм і кінетику абразивного зношування, що дозволяє визначити шляхи для управління експлуатаційними властивостями модифікованих поверхонь і удосконалювати технологію формування електроіскрових зносостійких покриттів.

Сучасні технологічні методи нанесення захисних покриттів відкривають необмежені можливості формування зносостійких структур, що забезпечують надійну роботу вузлів тертя в найрізноманітніших умовах контактної взаємодії. Потужним методом модифікування поверхневих шарів деталей вузлів тертя, їх хімічного складу і структури є електроіскрове легування, що базується на використанні дії електричного імпульсного розряду, який протікає між електродами. Метод дозволяє наносити на поверхню деталей матеріали з покращеними властивостями, такими як висока твердість, міцність, антикорозійність та інші. Це особливо важливо в умовах, де деталі піддаються інтенсивному зносу, наприклад, в авіаційній та автомобільній промисловості.

Розвиток нових матеріалів та високоефективних технологій робить електроіскрове легування ще більш актуальним для покращення зносостійкості деталей та отримання нових можливостей для їхнього вдосконалення.

Мета роботи полягала в обґрунтованому виборі методу зміцнення поверхні елементів трибоспряження композиційними покриттями з формуванням оптимальних фізико-механічних властивостей покриття-основа для підвищення їх зносостійкості в абразивному середовищі.

У **вступі** обґрунтовано важливість обраного напрямку, визначено ключову мету та цілі роботи. Висвітлено зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, описано методологічний інструментарій, використаний автором. Окрему увагу приділено викладу особистого внеску автора, опису отриманих вперше наукових положень та наведено можливості їх практичного впровадження.

Перший розділ включає комплексний науково-технічний аналіз експлуатаційної надійності вузлів тертя авіаційної та наземної техніки, а також проведена систематизація методів підвищення їхньої зносостійкості. Встановлено, що домінуючими чинниками виходу з ладу авіаційних компонентів є втомні руйнування (55–61%), перевантаження (14–18%) та корозійні процеси, тоді як знос становить 6–7% від загальної кількості відмов. Визначено специфічні особливості дефектів деталей наземної техніки, зумовлені інтенсивним впливом агресивних середовищ та підвищеними експлуатаційними навантаженнями. Особливу увагу приділено абразивному зношуванню як одному з найбільш інтенсивних видів триботехнічного руйнування, характерному для прецизійних вузлів та елементів шасі повітряних суден.

Розкрито фізичні механізми абразивного зношування, що охоплюють стадії впровадження твердих часток у поверхню тертя та їх подальшого пересування, що супроводжується пластичною деформацією і мікрорізанням матеріалу. Систематизовано ключові фактори, що спричиняють інтенсифікацію зносу: градієнт твердості в системі «абразив–матеріал», кінематичні параметри контакту та умови граничного мащення. Обґрунтовано доцільність застосування технологій інженерії поверхні, зокрема методу електроіскрового легування (ЕІЛ), як екологічно безпечного та енергоефективного способу формування функціональних покриттів. Доведено, що локальність енергетичного впливу при ЕІЛ дозволяє модифікувати поверхневі шари без термічної деструкції об'єму основного матеріалу.

Визначено роль параметрів імпульсних розрядів та складу електродних матеріалів у формуванні структури і властивостей легованого шару. Встановлено, що для досягнення максимальної зносостійкості в абразивних середовищах найбільш

ефективним є використання електродів на основі тугоплавких сполук (карбідів вольфраму, титану, боридів) та наноструктурованих композитів. Сформульовано необхідність переходу від статичних до динамічних математичних моделей взаємодії в системі «абразивна частка – деталь», які враховують високочастотні коливальні процеси та явища параметричного резонансу як критичні фактори руйнування мікрооб’ємів металу.

На основі здійсненого аналітичного огляду було встановлено мету дослідження, деталізовано його завдання та узагальнено отримані результати.

В другому розділі обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів, описано експериментальну установку для нанесення покриттів та систематизовано методики дослідження їхніх фізико-механічних і триботехнічних властивостей. Об’єктами дослідження обрано конструкційні сталі марок 30, 45, 30ХГСА та 40Х, які є базовими для виготовлення висоонавантажених вузлів авіаційної та наземної техніки. Для формування захисних шарів методом ЕІЛ використано широкий спектр електродних матеріалів, включаючи вуглецеві та швидкорізальні сталі (У10, Р18, Р6М5), тверді сплави (ВК8, ВК15, Т15К6), фероборхром та композиційну кераміку ЦЛАБ-1, що дозволило створювати покриття з різним фазовим складом і функціональними характеристиками.

Процес модифікації поверхонь здійснювали на установці «Елітрон-22А» за стабільного робочого струму 1 А, що забезпечувало формування наноструктурованих або аморфних шарів із високою адгезією до основи за мінімального термічного впливу на основний метал. Оцінку абразивної зносостійкості проводили на спеціалізованій установці за схемою тертя об нежорстко закріплені частинки кварцового піску згідно стандарту ASTM G65.

Комплексний структурний аналіз включав рентгенофазову ідентифікацію новоутворених фаз на дифрактометрі ДРОН-3М та оптичну металографію на мікроскопах ММР-2Р і ІЕ200М для візуалізації морфології, оцінки суцільності та товщини легованих шарів. Твердість матеріалу основи контролювали методом Роквелла,

тоді як для оцінки мікротвердості тонких (до 100 мкм) електроіскрових покриттів (ЕІП) обґрунтовано застосування методу Віккерса на приладі ПМТ-3. Вимірювання проводили на поперечних шліфах із навантаженням 20–100 г, що дозволило побудувати криві розподілу твердості по глибині та виявити зміцнений дифузійний підшар, відповідальний за експлуатаційну надійність системи «покриття–основа».

Третій розділ присвячено експериментальному дослідженню та теоретичному обґрунтуванню методів підвищення зносостійкості конструкційних сталей марок 30, 45 та 30ХГСА шляхом формування на їхній поверхні ЕІП різного складу. Основна мета роботи полягала у виборі оптимальних електродних матеріалів та режимів легування для забезпечення максимального опору абразивному зношуванню. Експериментально доведено, що зношування сталей без покриття підпорядковується залежності: чим вища твердість матеріалу (наприклад, сталь 30ХГСА з 200 НВ), тим менший його ваговий знос. Встановлено, що електроіскрове легування значно підвищує зносостійкість усіх досліджуваних сталей в абразивному середовищі за рахунок формування зміцненого поверхневого шару з новою фазовою структурою.

Досліджено вплив різних електродних матеріалів (сталі У10, Р18; сплави ВК8, Т15К6; кераміка ЦЛАБ-1) на відносну зносостійкість покриттів. Механізм підвищення зносостійкості покриттів ВК8 та Т15К6 полягає у створенні гетерогенної структури, яка поєднує високу твердість армуючих фаз (карбіди вольфраму WC та титану TiC) із в'язкістю кобальтової матриці, що створює бар'єри для руху дислокацій та запобігає крихкому сколюванню. ЕІП зі сталі Р18 забезпечує ефективний опір завдяки наявності складних карбідів вольфраму Fe_3W_3C та карбідоутворюючих елементів V і Cr . При цьому домінуючим механізмом руйнування для покриттів із високовуглецевої сталі У10 та кераміки ЦЛАБ-1 є крихке руйнування, пов'язане з наявністю крихких карбідів заліза або боридів цирконію.

Особливу увагу в розділі приділено аналізу динамічних процесів при терті. Проаналізовано, що в зоні контакту абразивна частка–покриття–основа виникають параметричні та автоколивальні процеси, які призводять до розвитку багатоциклових

напружень та деформацій. Ці динамічні явища спричиняють утворення деформаційних хвиль та мікротріщин, що інтенсифікує втомне зношування поверхні. Розроблено розрахункову схему, де поверхневі шари представлені як анізотропні пластини на пружній основі, що дозволило визначити умови виникнення динамічно нестійких станів та небезпечних напружень, які можуть призвести до порушення цілісності ЕІП.

У четвертому розділі досліджено вплив фракційного складу абразиву на зносостійкість конструкційних сталей марок 45, 40X та 30ХГСА у нормалізованому стані, а також після ЕІП електродами ВК8 та Р18. Експериментально встановлено, що інтенсивність зношування сталей суттєво зростає зі збільшенням розміру абразивних частинок з 250 мкм до 500 мкм. При цьому змінюється домінуючий механізм руйнування: від втомного зношування при використанні дрібного абразиву до глибокого дряпання та мікрорізання при великому розмірі частинок.

Досліджено, що абразивна стійкість сталей у вихідному стані корелює з розміром зерна та структурними особливостями: сталь 30ХГСА, яка має найменший розмір зерна (~15–20 мкм) та сорбітоподібний перліт, виявилася найбільш стійкою до великодисперсного абразиву.

Нанесення ЕІП змінює процес зношування. Найвищу ефективність підвищення зносостійкості продемонструвало покриття ВК8 на сталі 40X: зменшення зносу модифікованої поверхні зафіксовано в 11,67 разів при терті в абразиві розміром 500 мкм.

Для покриттів зі швидкорізальної сталі Р18 встановлено схильність до прискореного викришування при терті дрібним абразивом (250 мкм) через дискретний характер покриття та наявність мікрорельєфу, що сприяє фіксації абразивних частинок. При використанні крупнодисперсного абразиву ефективність покриття Р18 зростає завдяки переходу до режиму вдавлювання/плугування.

Низьку зносостійкість зафіксовано для покриття Fe-Cr-B, що пов'язано з формуванням крихких еліпсоїдальних боридів у м'якій феритній матриці; під час тертя бориди розколюються, а м'яка матриця легко руйнується, що призводить до катастрофічного зносу.

Наукова новизна дисертаційної роботи сформована на основі встановлених закономірностей, а саме:

Вперше:

- встановлена кореляція між структурним станом конструкційних сталей (розміром зерна та морфологією перліту) та їхньою здатністю протистояти абразивному впливу часток різної дисперсності: сталь 30ХГСА з дрібнозернистою структурою (~15–20 мкм) та сорбітоподібним перлітом виявляє вищу стабільність до великодисперсного абразиву порівняно зі сталлю 45, де крупне зерно (~40 мкм) сприяє інтенсифікації механізму «викришування»;

- визначено фізичну природу низької абразивної стійкості композиційного боридного ЕП Fe-Cr-B. Встановлено, що механізм їх руйнування ініціюється розколюванням крихких еліпсоїдальних боридів з наступним швидким руйнуванням м'якої феритної матриці, що призводить до катастрофічного відшарування модифікованого шару.

Удосконалено:

- оцінку синергетичного механізму абразивної стійкості композиційних електроіскрових покриттів на основі сплавів ВК8, ВК15 та Т15К6, яка полягає у поєднанні бар'єрного ефекту для руху дислокацій, що створюють тверді армуючі фази (WC та TiC), із демпфуючою здатністю в'язкої кобальтової матриці, що запобігає передчасному крихкому сколюванню зміцнюючих часток;

- математичну модель взаємодії в системі «абразивна частка – деталь», де поверхневі шари розглядаються як анізотропні пластини на пружній основі. Це дозволило вперше аналітично визначити умови втрати стійкості мікрооб'ємів металу (за Ейлером), що пояснює явище «нагортання» матеріалу попереду абразиву через динамічні процеси (параметричний резонанс) у зоні контакту.

Отримали подальший розвиток:

- теорія формування зносостійких структур при електроіскровому легуванні: підвищення триботехнічних властивостей сталей 30, 45 та 30ХГСА досягається не лише

за рахунок твердості основи, а й завдяки створенню модифікованого шару з принципово новою фазовою структурою, яка забезпечує градієнтний розподіл мікротвердості по глибині системи «покриття–основа»;

– наукові уявлення про умови забезпечення ефективного опору абразивному зношуванню, згідно з якими встановлено, що для мінімізації деструктивних процесів мікротвердість покриття повинна перевищувати твердість абразивних часток у раціональному співвідношенні 0,6...0,8.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано технологію електроіскрового легування та технологічні інструкції по підвищенню зносостійкості, по відновленню фізико-механічних та міцнісних характеристик інтенсивно навантажених деталей авіаційної техніки за рахунок управління структурними ефектами та фазовим складом поверхневих модифікованих шарів конструкційних сталей нанесенням електроіскрових покриттів з необхідним рівнем триботехнічних властивостей (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 09.12.2025 року, АТ «АНТОНОВ»: на основі лабораторних випробувань абразивної стійкості електроіскрових покриттів при відновленні елементів стійок шасі для підвищення їх строку служби рекомендовано розглянути можливість подальших стендових випробувань).

2. Впроваджено у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут»: в тематичний план лекцій, практичних та лабораторних занять з дисциплін «Основи надійності машин та механізмів» та «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» включено теоретичні питання, пов'язані з застосуванням сучасних електродів на основі зносостійких композиційних матеріалів та практичне застосування методу електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; при підготовці кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 131 Прикладна механіка використовуються методики ЕІЛ та зносостійкі електроди. (акт про впровадження в навчальний процес від 24.09.2025 року).

Ключові слова: електроіскрове легування, електроіскрове покриття, тертя ковзання, знос, зносостійкість, математична модель, власні частоти, вимушені поперечні коливання, рельєф поверхні, твердість

ABSTRACT

Skvortsov O. O. Enhancement of Wear Resistance of Tribological Pair Elements in an Abrasive Environment by Applying Composite Coatings. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 131 Applied Mechanics. State University “Kyiv Aviation Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the study of general regularities and micromechanical properties of electro-spark coatings and to the assessment of their influence on the mechanism and kinetics of abrasive wear. This makes it possible to determine ways of controlling the operational properties of modified surfaces and to improve the technology for forming electro-spark wear-resistant coatings.

Modern technological methods of applying protective coatings provide extensive opportunities for forming wear-resistant structures that ensure reliable operation of friction units under various contact interaction conditions. A powerful method for modifying the surface layers of friction unit components, their chemical composition and structure, is electro-spark alloying (ESA), which is based on the action of an electrical pulsed discharge occurring between electrodes. The method makes it possible to apply materials with improved properties to the surface of parts, such as high hardness, strength, corrosion resistance, and others. This is especially important under conditions where components are subjected to intensive wear, for example, in the aviation and automotive industries.

The development of new materials and highly efficient technologies makes electro-spark alloying even more relevant for improving the wear resistance of components and creating new opportunities for their enhancement.

The aim of the work was the substantiated selection of a surface strengthening method for tribological pair elements by composite coatings with the formation of optimal physical and mechanical properties of the coating–substrate system to increase their wear resistance in an abrasive environment.

The **introduction** substantiates the importance of the chosen research direction, defines the key goal and objectives of the work. The connection of the research with scientific programs and topics is highlighted, and the methodological tools used by the author are described. Special attention is paid to the author's personal contribution, the description of scientific provisions obtained for the first time, and the possibilities of their practical implementation.

The first chapter includes a comprehensive scientific and technical analysis of the operational reliability of friction units in aviation and ground equipment, as well as a systematization of methods for improving their wear resistance. It was established that the dominant factors of failure of aviation components are fatigue failures (55–61%), overloads (14–18%), and corrosion processes, while wear accounts for 6–7% of the total number of failures. The specific features of defects in ground equipment components caused by the intensive influence of aggressive environments and increased operational loads are determined. Special attention is paid to abrasive wear as one of the most intensive types of tribotechnical failure, typical of precision units and aircraft landing gear elements.

The physical mechanisms of abrasive wear are revealed, including the stages of penetration of hard particles into the friction surface and their subsequent movement accompanied by plastic deformation and micro-cutting of the material. The key factors causing wear intensification are systematized: the hardness gradient in the “abrasive–material” system, kinematic contact parameters, and boundary lubrication conditions. The expediency of applying surface engineering technologies, in particular the electro-spark alloying (ESA) method, as an environmentally friendly and energy-efficient way of forming functional coatings is substantiated. It is proved that the locality of energy impact during ESA makes it possible to modify surface layers without thermal destruction of the bulk base material.

The role of pulse discharge parameters and electrode material composition in forming the structure and properties of the alloyed layer is determined. It is established that to achieve maximum wear resistance in abrasive environments, the most effective approach is the use of electrodes based on refractory compounds (tungsten carbides, titanium carbides, borides) and nanostructured composites. The necessity of transitioning from static to dynamic mathematical

models of interaction in the “abrasive particle–component” system is formulated, taking into account high-frequency oscillatory processes and parametric resonance phenomena as critical factors in the destruction of metal microvolumes.

Based on the analytical review, the research objective was specified, its tasks were detailed, and the obtained results were generalized.

The second chapter substantiates the choice of structural materials, describes the experimental setup for coating deposition, and systematizes the methods for studying their physical, mechanical, and tribotechnical properties. Structural steels of grades 30, 45, 30KhGSA, and 40Kh were selected as research objects, as they are basic materials for manufacturing highly loaded units of aviation and ground equipment. To form protective layers by ESA, a wide range of electrode materials was used, including carbon and high-speed steels (U10, R18, R6M5), hard alloys (VK8, VK15, T15K6), ferrochrome-boron, and composite ceramic TsLAB-1, which made it possible to create coatings with different phase compositions and functional characteristics.

Surface modification was carried out using the “Elitron-22A” installation at a stable operating current of 1 A, ensuring the formation of nanostructured or amorphous layers with high adhesion to the substrate and minimal thermal impact on the base metal. Abrasive wear resistance was evaluated using a specialized setup according to the scheme of friction against loosely fixed quartz sand particles in accordance with ASTM G65.

Comprehensive structural analysis included X-ray phase identification of newly formed phases using a DRON-3M diffractometer and optical metallography using MMR-2R and IE200M microscopes to visualize morphology and assess the continuity and thickness of alloyed layers. The hardness of the base material was measured by the Rockwell method, while the Vickers method using a PMT-3 device was substantiated for evaluating the microhardness of thin (up to 100 μm) electro-spark coatings (ESC). Measurements were carried out on cross-sections under loads of 20–100 g, which made it possible to construct hardness distribution curves over depth and identify the strengthened diffusion sublayer responsible for the operational reliability of the “coating–substrate” system.

The third chapter is devoted to the experimental study and theoretical substantiation of methods for increasing the wear resistance of structural steels 30, 45, and 30KhGSA by forming electro-spark coatings of various compositions on their surface. The main objective was to select optimal electrode materials and alloying modes to ensure maximum resistance to abrasive wear. It was experimentally proved that the wear of uncoated steels follows the dependence: the higher the material hardness (for example, 30KhGSA steel with 200 HB), the lower the weight loss. It was established that electro-spark alloying significantly increases the wear resistance of all studied steels in an abrasive environment due to the formation of a strengthened surface layer with a new phase structure.

The influence of various electrode materials (U10, R18 steels; VK8, T15K6 alloys; TsLAB-1 ceramic) on the relative wear resistance of coatings was studied. The mechanism of increasing wear resistance of VK8 and T15K6 coatings lies in the creation of a heterogeneous structure combining the high hardness of reinforcing phases (WC and TiC carbides) with the toughness of a cobalt matrix, which creates barriers to dislocation motion and prevents brittle chipping. ESC from R18 steel provides effective resistance due to the presence of complex tungsten carbides $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ and carbide-forming elements V and Cr. At the same time, the dominant failure mechanism for coatings from high-carbon U10 steel and TsLAB-1 ceramic is brittle fracture associated with the presence of brittle iron carbides or zirconium borides.

Particular attention is paid to the analysis of dynamic processes during friction. It is shown that parametric and self-oscillatory processes arise in the abrasive particle–coating–substrate contact zone, leading to the development of multicycle stresses and deformations. These dynamic phenomena cause the formation of deformation waves and microcracks, intensifying surface fatigue wear. A calculation scheme was developed in which surface layers are represented as anisotropic plates on an elastic foundation, making it possible to determine the conditions for dynamically unstable states and dangerous stresses that may lead to the integrity loss of ESC.

The fourth chapter investigates the influence of abrasive particle size distribution on the wear resistance of structural steels 45, 40Kh, and 30KhGSA in the normalized state and

after ESA with VK8 and R18 electrodes. It was experimentally established that the wear intensity of steels increases significantly with an increase in abrasive particle size from 250 μm to 500 μm . At the same time, the dominant failure mechanism changes: from fatigue wear when using fine abrasive to deep scratching and micro-cutting with large particles.

It was found that the abrasive resistance of steels in the initial state correlates with grain size and structural features: 30KhGSA steel, which has the smallest grain size ($\sim 15\text{--}20\ \mu\text{m}$) and sorbite-like pearlite, proved to be the most resistant to coarse abrasive.

The application of ESC changes the wear process. The highest efficiency in increasing wear resistance was demonstrated by the VK8 coating on 40Kh steel: the wear of the modified surface decreased by 11.67 times during friction with 500 μm abrasive.

For R18 high-speed steel coatings, a tendency to accelerated chipping under friction with fine abrasive (250 μm) was established due to the discrete nature of the coating and the presence of microrelief that facilitates abrasive particle retention. When using coarse abrasive, the effectiveness of the R18 coating increases due to the transition to an indentation/ploughing mode.

Low wear resistance was recorded for the Fe-Cr-B coating, which is associated with the formation of brittle ellipsoidal borides in a soft ferritic matrix; during friction, the borides fracture and the soft matrix is easily destroyed, leading to catastrophic wear.

Scientific novelty of the dissertation:

For the first time:

- a correlation was established between the structural state of structural steels (grain size and pearlite morphology) and their ability to resist abrasive action of particles of different dispersion: 30KhGSA steel with a fine-grained structure ($\sim 15\text{--}20\ \mu\text{m}$) and sorbite-like pearlite exhibits higher stability against coarse abrasive compared to 45 steel, where coarse grains ($\sim 40\ \mu\text{m}$) intensify the “chipping” mechanism;

- the physical nature of the low abrasive resistance of composite boride ESC Fe-Cr-B was determined. It was established that their failure mechanism is initiated by the fracture of

brittle ellipsoidal borides followed by rapid destruction of the soft ferritic matrix, leading to catastrophic delamination of the modified layer.

Improved:

- the assessment of the synergistic mechanism of abrasive resistance of composite electro-spark coatings based on VK8, VK15, and T15K6 alloys, which consists in combining the barrier effect for dislocation motion created by hard reinforcing phases (WC and TiC) with the damping ability of the tough cobalt matrix, preventing premature brittle chipping of strengthening particles;
- a mathematical model of interaction in the “abrasive particle–component” system, where surface layers are considered as anisotropic plates on an elastic foundation. This made it possible for the first time to analytically determine the conditions for loss of stability of metal microvolumes (according to Euler), explaining the phenomenon of material “pile-up” in front of the abrasive due to dynamic processes (parametric resonance) in the contact zone.

Further developed:

- the theory of formation of wear-resistant structures during electro-spark alloying: improvement of tribotechnical properties of steels 30, 45, and 30KhGSA is achieved not only due to substrate hardness but also due to the creation of a modified layer with a fundamentally new phase structure that ensures a gradient distribution of microhardness over the depth of the “coating–substrate” system;
- scientific concepts regarding the conditions for ensuring effective resistance to abrasive wear, according to which it was established that to minimize destructive processes, the microhardness of the coating should exceed the hardness of abrasive particles within a rational ratio of 0.6–0.8.

Practical significance of the obtained results:

1. A technology of electro-spark alloying and technological guidelines for increasing wear resistance and restoring the physical-mechanical and strength characteristics of heavily loaded aircraft components have been proposed by controlling structural effects and phase composition of surface-modified layers of structural steels through the application of electro-

spark coatings with the required level of tribotechnical properties (act of implementation dated December 9, 2025, JSC “ANTONOV”: based on laboratory tests of abrasive resistance of electro-spark coatings in the restoration of landing gear strut elements to increase their service life, it is recommended to consider the possibility of further bench tests).

2. The results have been implemented in the educational process of the State University “Kyiv Aviation Institute”: theoretical issues related to the use of modern electrodes based on wear-resistant composite materials and practical application of electro-spark alloying for strengthening contact surfaces have been included in lecture, practical, and laboratory courses “Fundamentals of Reliability of Machines and Mechanisms” and “Technologies of Structural Materials” for Bachelor’s degree students; ESA methods and wear-resistant electrodes are used in the preparation of qualification works for Master’s degree students in Specialty 131 Applied Mechanics (act of implementation in the educational process dated September 24, 2025).

Keywords: electro-spark alloying, electric spark coating, sliding friction, wear, wear resistance, mathematical model, natural frequencies, forced transverse vibrations, surface relief, hardness

Список публікацій здобувача

У фахових виданнях категорії Б:

1. **Skvortsov O.O.**, Mikosianchyk O.O. Estimation of tribo-technical parameters of composite polymer with metal filler. *Problems of Tribology*. 2022. V. 27, No 2/104. P.42-48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-42-48>
2. Медюх Р.М., Медюх В.К., Присяжнюк В.В., Лабунець В.Ф., **Скворцов О.О.** Дослідження структури та трибологічних властивостей композиційного плазмового покриття на основі сталі. *Вісник вінницького політехнічного інституту*. 2023. 4 (169). С. 54-60. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-54-60>
3. **Скворцов О.О.**, Мікосянчик О.О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С. 64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)
4. **Скворцов О.О.**, Мікосянчик О.О. Залежність зносостійкості електроіскрових покриттів в абразивному середовищі від зміцнюючих фаз. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. 3 (104). С.78-90. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18983](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18983)
5. Mikosianchyk O.O., **Skvortsov O.O.**, A. O. Kornienko Improving the wear resistance of structural steels by electrospark deposition. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 2 (107). С. 40-47. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(107\).20145](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(107).20145)
6. Malinovskyi Y., Mikosianchyk O., Uchytel O., **Skvortsov O.** et all. Dynamic processes in surface layers of parts as a source of their multicycle failure under friction and wear. *Problems of Tribology*. 2025. 30(3/117). P. 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-41-48>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Литвиненко В.А., **Скворцов О.О.**, Мікосянчик О.О. Оцінка якості композиційного матеріалу критерієм міцності. *Безпека в авіації та космічні технології*:

матеріали X Всесвітнього конгресу “Авіація в XXI столітті”, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р., 2022. С. 1.3.5-1.3.8.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8517/7013>

8. Бородій В.М., **Скворцов О.О.**, Ільїна О.А. Оцінка елестогідродинамічних показників зубчастої передачі героторного масляного насосу. *Безпека в авіації та космічні технології*: матеріали X Всесвітнього конгресу “Авіація в XXI столітті”, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р., Київ, 2022. Р.1.3.27-1.3.30.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8867/7018>

9. **Скворцов О.О.** Зносостійкі новітні матеріали електродів для електроіскрових покриттів. *«ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки»*: XXIV Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, м.Київ, 2-5 квітня 2024 р., Київ, 2024. С. 131-132.

https://aki.nau.edu.ua/wp-content/uploads/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%8224_%D0%90%D0%9A%D0%A4.pdf

10. **Скворцов О.О.** Моделювання процесу зношування вузлів тертя авіаційної техніки. *«Політ. Сучасні проблеми науки»*: XXV Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених”, м. Київ, 1-4 квітня 2025 р., Київ, 2025. С.52-54.

https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025_AKF.pdf

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗМІН ВУЗЛІВ ТЕРТЯ АВІАЦІЙНОЇ ТА НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.....	29
1.1. Аналіз пошкоджень та відмов вузлів тертя авіаційної та наземної техніки	29
1.1.1. Характеристика типових дефектів деталей та механізмів.....	29
1.1.2. Механізми абразивного зношування.....	31
1.2. Методи підвищення зносостійкості вузлів тертя авіаційної техніки ...	36
1.2.1. Загальна інформація про метод електроіскрового легування.....	40
1.2.2. Сутність методу електроіскрової обробки.....	42
1.3. Матеріали для відновлення та зміцнення деталей авіаційної техніки при експлуатації в абразивному середовищі	50
1.3.1. Вимоги до вибору зносостійких матеріалів	50
1.3.2. Матеріали для виготовлення електродів для електроіскрового легування.....	53
1.4. Математичні моделі динамічної взаємодії в системі «абразивна частка – деталь».....	56
Висновки до розділу 1.....	60
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, УСТАНОВКА ДЛЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ АБРАЗИВНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ	63
2.1. Конструкційні матеріали основи та електродів для електроіскрового легування	63
2.2. Методика електроіскрового легування	66
2.3. Методика випробування ЕІП на абразивне зношування	69

2.4. Металографічний та рентгеноструктурний аналіз матеріалів.....	73
2.5. Методи вимірювання твердості матеріалу основи та ЕП.....	76
Висновки до розділу 2.....	81
РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМИ ПОКРИТТЯМИ	85
3.1. Оцінка відносної зносостійкості ЕП на сталі 45.....	85
3.2. Залежність зносостійкості електроіскрових покриттів на основі композиційних матеріалів та сталей від зміцнюючих фаз	88
3.3. Вплив карбідів ЕП на зносостійкість конструкційних сталей 30, 45 та 30ХГСА	92
3.4. Динамічні процеси у поверхневих шарах деталей авіаційної техніки при терті і зношуванні в абразивному середовищі	98
Висновки до розділу 3.....	109
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ АБРАЗИВУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ...	113
4.1. Оцінка зносостійкості сталей марок 45, 40Х та 30ХГСА в нормалізованому стані та зміцнених ЕП в абразивному середовищі залежно від розміру абразиву	113
4.2. Вибір зносостійких композиційних електроіскрових покриттів за комплексними показниками зносостійкості, мікротвердості, морфологічних характеристик покриттів.....	125
Висновки до розділу 4.....	135
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	140
ДОДАТКИ.....	158

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення надійності і довговічності конструкційних елементів повітряних суден (ПС) і авіаційної наземної техніки на сьогодні є першочерговим завданням, при вирішенні якого необхідно враховувати їх зв'язок з працездатністю вузлів тертя. Багаторічний досвід експлуатації і ремонту авіаційної техніки (АТ) та технічних засобів, які її обслуговують, показав, що у більшості випадків їх працездатність залежить від зносостійкості деталей вузлів тертя.

Одним із напрямків забезпечення експлуатаційної надійності технічних систем є використання і розроблення нових сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення металів та сплавів [1].

Збільшення терміну експлуатації сучасних машин, механізмів та технологічного оснащення – одна із важливих проблем забезпечення якості і конкурентоспроможності галузі машинобудування. Суттєві матеріальні втрати внаслідок тертя та зношування контактуючих деталей трибовузлів поставили першочергову задачу збільшення довговічності вузлів тертя. Висока вартість конструкцій, складність умов роботи трибосистем висувають жорсткі вимоги до вибору матеріалів трибосполучень, пошуку нових ефективних технологій поверхневого зміцнення та відновлення зношених деталей тертя, аналізу процесів, які розвиваються на робочих поверхнях контактуючих деталей.

Сучасні технологічні методи нанесення захисних покриттів відкривають необмежені можливості формування зносостійких структур, що забезпечують надійну роботу вузлів тертя в найрізноманітніших умовах контактної взаємодії, а саме: при великих навантаженнях; кавітації; радіації; корозійних і агресивних середовищ і т.п.

Потужним методом модифікування поверхневих шарів деталей вузлів тертя, їх хімічного складу і структури є електроіскрове легування (ЕІЛ), що базується на використанні дії електричного імпульсного розряду, який протікає між електродами. При цьому спостерігається перенесення матеріалу аноду (електроду) на катод (деталь).

Актуальність методів електроіскрового легування для підвищення зносостійкості

деталей залишається високою у багатьох галузях та сферах, особливо в промисловому виробництві.

Електроіскрове легування застосовується для відновлення пошкоджених або зношених деталей, замість повного їхнього видалення та заміни. Це дозволяє значно зекономити час і гроші, а також продовжити термін служби обладнання.

Метод дозволяє наносити на поверхню деталей матеріали з покращеними властивостями, такими як висока твердість, міцність, антикорозійність та інші. Це особливо важливо в умовах, де деталі піддаються інтенсивному зносу, наприклад, в авіаційній та автомобільній промисловості.

Електроіскрове легування відзначається низькими термічними навантаженнями на деталі, що обробляються. Це особливо важливо для деталей, виготовлених із складних матеріалів або деталей з важким доступом, де термічна деформація може призвести до негативних наслідків.

Заміна пошкоджених деталей або повна переробка обладнання може бути дорогою із значними часовими затратами. Електроіскрове легування дозволяє заощадити витрати на ремонт та обслуговування, оскільки використовує лише необхідну кількість матеріалу.

Зменшення витрат матеріалу та енергії в процесі електроіскрового легування сприяє зменшенню викидів та відходів, що відповідає сучасним екологічним стандартам та допомагає знизити вплив промисловості на навколишнє середовище.

Розвиток нових матеріалів та високоефективних технологій робить електроіскрове легування ще більш актуальним для покращення зносостійкості деталей та отримання нових можливостей для їхнього вдосконалення.

Усі вищевказані чинники роблять метод електроіскрового легування важливим і актуальним для вирішення завдань підвищення зносостійкості деталей авіаційної та наземної техніки. Вивчення загальних закономірностей і мікромеханічних властивостей сформованого шару при ЕІЛ та їх вплив на механізм і кінетику зношування дозволяє визначити шляхи для управління експлуатаційними властивостями модифікованих

поверхонь і удосконалювати технологію формування електроіскрових зносостійких покриттів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Державного університету «Київський авіаційний інститут». Дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення довговічності та забезпечення міцності елементів конструкцій авіаційної техніки» № 16-2022/ 07.01.01. (0125U001009). Автором проведено оцінку зносостійкості електроіскрових покриттів в абразивному середовищі від зміцнюючих фаз та визначено максимальний опір пластичної деформації по допустимим напруження на розтягання для конструкційних сталей 30, 45 та 30ХГСА.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягала в обґрунтованому виборі методу зміцнення поверхні елементів трибоспряження композиційними покриттями з формуванням оптимальних фізико-механічних властивостей покриття-основа для підвищення їх зносостійкості в абразивному середовищі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

- проаналізувати ключові фактори, що спричиняють абразивне зношування вузлів тертя авіаційної та наземної техніки;
- вибрати раціональні шляхи управління експлуатаційними властивостями модифікованих поверхонь та удосконалення технології формування електроіскрових зносостійких покриттів;
- дослідити мікроструктуру і механічні властивості отриманих покриттів;
- встановити залежності інтенсивності зношування конструкційних сталей від розміру абразивних частинок та механізму руйнування;
- дослідити механізм підвищення зносостійкості покриттів із твердих сплавів (ВК8, ВК15, Т15К6);
- проаналізувати закономірності градієнтного розподілу мікротвердості по глибині ЕП-основа та його вплив на відшарування покриття;

- дослідити вплив карбідів на підвищення опору зношуванню ЕП зі сталі Р18, У10, кераміки ЦЛАБ-1; порошкового дроту Fe-Cr-B;
- визначити критичне співвідношення мікротвердості покриття до твердості абразиву для ефективного опору абразивному зношуванню;
- проаналізувати з застосуванням математичного апарату динамічні процеси при терті деталей з ЕП в абразивному середовищі, що характеризуються виникненням автоколивань.

Об’єкт дослідження – процеси зношування та зміцнення поверхонь елементів трибоспрями, що працюють в умовах абразивного впливу.

Предмет дослідження – закономірності формування мікроструктури, фазового складу, градієнтного розподілу фізико-механічних властивостей та механізмів руйнування зносостійких композиційних електроіскрових покриттів при взаємодії з абразивним середовищем.

Методи дослідження. Для дисертаційної роботи було використано комплекс методів досліджень, які можна згрупувати за основними етапами роботи. Основним методом отримання покриттів було електроіскрове легування, процес нанесення покриттів відбувався за допомогою установки «Елітрон-22А». Для випробування трибологічних властивостей використовувались випробування на абразивне зношування за методикою, аналогічною стандарту ASTM G65 Abrasive Wear Test, з використанням кварцового піску зернистістю 250...500 мкм; вимірювання лінійного зносу – за допомогою вертикального оптиметра ІКВ-6, та вимірювання вагового зносу за допомогою ваг Axis ANG200C. Аналіз структури та властивостей матеріалів включав рентгеноструктурний фазовий аналіз на дифрактометрі ДРОН-3М, металографічні дослідження мікроструктури за допомогою оптичних мікроскопів ММР-2Р та інвертованого мікроскопа ІЕ200М, вимірювання твердості основи методом Роквелла, та вимірювання мікротвердості покриттів методом Віккерса на приладі ПМТ-3 для оцінки градієнтного розподілу твердості по глибині шару.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- встановлена кореляція між структурним станом конструкційних сталей (розміром зерна та морфологією перліту) та їхньою здатністю протистояти абразивному впливу часток різної дисперсності: сталь 30ХГСА з дрібнозернистою структурою (~15–20 мкм) та сорбітоподібним перлітом виявляє вищу стабільність до великодисперсного абразиву порівняно зі сталлю 45, де крупне зерно (~40 мкм) сприяє інтенсифікації механізму «викришування»;
- визначено фізичну природу низької абразивної стійкості композиційного боридного ЕП Fe-Cr-B. Встановлено, що механізм їх руйнування ініціюється розколюванням крихких еліпсоїдальних боридів з наступним швидким руйнуванням м'якої феритної матриці, що призводить до катастрофічного відшарування модифікованого шару.

Удосконалено:

- оцінку синергетичного механізму абразивної стійкості композиційних електроіскрових покриттів на основі сплавів ВК8, ВК15 та Т15К6, яка полягає у поєднанні бар'єрного ефекту для руху дислокацій, що створюють тверді армуючі фази (WC та TiC), із демпфуючою здатністю в'язкої кобальтової матриці, що запобігає передчасному крихкому сколюванню зміцнюючих часток;
- математичну модель взаємодії в системі «абразивна частка – деталь», де поверхневі шари розглядаються як анізотропні пластини на пружній основі. Це дозволило вперше аналітично визначити умови втрати стійкості мікрооб'ємів металу (за Ейлером), що пояснює явище «нагортання» матеріалу попереду абразиву через динамічні процеси (параметричний резонанс) у зоні контакту.

Отримали подальший розвиток:

- теорія формування зносостійких структур при електроіскровому легуванні: підвищення триботехнічних властивостей сталей 30, 45 та 30ХГСА досягається не лише за рахунок твердості основи, а й завдяки створенню модифікованого шару з принципово

новою фазовою структурою, яка забезпечує градієнтний розподіл мікротвердості по глибині системи «покриття–основа»;

– наукові уявлення про умови забезпечення ефективного опору абразивному зношуванню, згідно з якими встановлено, що для мінімізації деструктивних процесів мікротвердість покриття повинна перевищувати твердість абразивних часток у раціональному співвідношенні 0,6...0,8.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано технологію електроіскрового легування та технологічні інструкції по підвищенню зносостійкості, по відновленню фізико-механічних та міцнісних характеристик інтенсивно навантажених деталей авіаційної техніки за рахунок управління структурними ефектами та фазовим складом поверхневих модифікованих шарів конструкційних сталей нанесенням електроіскрових покриттів з необхідним рівнем триботехнічних властивостей (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 09.12.2025 року, АТ «АНТОНОВ»: на основі лабораторних випробувань абразивної стійкості електроіскрових покриттів при відновленні елементів стійок шасі для підвищення їх строку служби рекомендовано розглянути можливість подальших стендових випробувань).

2. Впроваджено у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут»: в тематичний план лекцій, практичних та лабораторних занять з дисциплін «Основи надійності машин та механізмів» та «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» включено теоретичні питання, пов'язані з застосуванням сучасних електродів на основі зносостійких композиційних матеріалів та практичне застосування методу електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; при підготовці кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 131 Прикладна механіка використовуються методики ЕІЛ та зносостійкі електроди. (акт про впровадження в навчальний процес від 24.09.2025 року).

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, теоретичні та практичні результати, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. З публікацій у співавторстві використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведено оцінку триботехнічних параметрів композиційного полімеру з металевим наповнювачем у вузлах ковзання в авіаційній промисловості – [1]; досліджено особливості структуроутворення та фізико-механічні властивості композиційних сталевих плазмових покриттів – [2]; проведено аналіз сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення деталей машин, визначено перспективність електроіскрового легування сплавів на основі заліза, встановлено вплив матеріалів електрода на зносостійкість ЕІЛ покриттів – [3]; проаналізовано механізми зношування в умовах впливу вільного абразиву електроіскрових покриттів сталей У10 та Р18, сплаву ВК8 та кераміки ЦЛАБ-1 на конструкційних сталях 30ХГСА та 45, визначено залежність інтенсивності зношування електроіскрових покриттів від твердості карбідів та боридів і співвідношення зміцнюючої фази в матриці – [4]; обґрунтовано підвищення зносостійкості конструкційних сталей при нанесенні електроіскрових покриттів за рахунок більш ефективного опору поверхневих зміцнених шарів за умов впливу абразивних часток, що обумовлено формуванням покриттів з високою часткою карбідів Fe, W, Cr, V – [5]; розглянуті фрикційні та параметричні коливання при взаємодії деталей, які ведуть до утворення деформаційних хвиль, їх часткового, чи повного зрізання, що утворює передумови до інтенсивного зношування, та послідує руйнування деталей – [6].

Апробація результатів дисертації. Ключові результати та висновки проведеного дослідження пройшли апробацію шляхом їх оприлюднення на науково-практичних конференціях різних рівнів:

– X Всесвітньому конгресі “Авіація в XXI столітті”, Безпека в авіації та космічні технології, Національний авіаційний університет, м. Київ, вересень 2022 року;

– X Всесвітньому конгресі “Авіація в XXI столітті”, Безпека в авіації та космічні технології, Національний авіаційний університет, м. Київ, вересень 2022 року;

- XXV Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», м. Київ, квітень 2024 року;
- XXV Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», м. Київ, квітень 2025 року.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях переліку МОН України (категорія Б); 4 праці апробаційного характеру.

Відповідно до п.3.6 «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук», затвердженого Постановою КМУ № 261 (із змінами в редакції постанови КМУ від 19.05.2023 № 502) від 23.03.2016 р., та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.: наукові результати дисертації висвітлені у 4,5 наукових публікаціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, основні результати і висновки, список використаних джерел та додатки. Список використаних джерел із 145 найменувань на 17 сторінках. Додаток – 5 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 116 сторінок, загальний обсяг дисертації складає 163 сторінки. Всього в роботі 24 таблиці, 39 рисунків та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗМІН ВУЗЛІВ ТЕРТЯ АВІАЦІЙНОЇ ТА НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

1.1. Аналіз пошкоджень та відмов вузлів тертя авіаційної та наземної техніки.

Через різні умови навколишнього середовища та експлуатації повітряних суден (ПС) піддаються зносу. Конструктивні компоненти, шасі, двигуни та інші системи повинні проходити регулярне технічне обслуговування, забезпечуючи безпечний політ ПС. Вирішенню проблеми забезпечення працездатності деталей вузлів тертя авіаційної техніки присвячені роботи багатьох вітчизняних [2-7] та зарубіжних дослідників [8, 9].

1.1.1. Характеристика типових дефектів деталей та механізмів.

Незважаючи на те, що використання передових композиційних матеріалів у ПС постійно збільшується, металеві матеріали становлять 45% від загальної ваги (20% алюмінію, 15% титану та 10% сталі) Boeing 787, Airbus A350 має подібний розподіл матеріалів: 20% Al, сплави Al-Li, 14% титану та 7% сталі за вагою [10]. Алюміній використовується в передніх кромках крил і хвоста; титан в основному використовується для деталей двигуна та кріплень, використання сталі переважає в шасі, передній кромці крил, пілонах двигуна, петлях, тросах, кріпленнях тощо. В таблиці 1.1 представлено основні види пошкоджень ПС.

Таблиця 1.1

Кількість відмов у компонентах повітряних суден [11]

Тип пошкоджень	Відсоток (%) відмов
Втома	55–61
Корозія	3–16
Перевантаження	14–18
Корозійне розтріскування під напругою/корозійна втома/воднева крихкість	7–8
Знос	6–7
Високотемпературна корозія	2
Повзучість	1

Дефектами деталей вузлів тертя називаються будь-які відхилення від проектних розмірів, форми, структури або властивостей матеріалу, що знижують їхню працездатність. Дефекти можуть виникати в процесі виготовлення, експлуатації або зберігання деталей.

До типових дефектів деталей вузлів тертя авіаційної та наземної техніки відносять[12]:

- знос – це поступове руйнування поверхні деталі в результаті взаємодії з іншою поверхнею. Знос може бути абразивним, корозійним, ерозійним, втомним, термічним та ін. [13, 14];

- розтріскування – це утворення тріщин в об'ємі деталі. Розтріскування може бути поверхневим, внутрішнім або змішаним;

- деформація – це зміна форми або розмірів деталі. Деформація може бути пластичною або пружною;

- корозія – це руйнування матеріалу під впливом хімічних або електрохімічних процесів. Корозія може бути газовою, рідинною або електрохімічною;

- втома – це руйнування матеріалу в результаті циклічних навантажень. Втома може бути поверхневою або внутрішньою.

Дефекти матеріалу можуть бути макроскопічними (видимими неозброєним оком) або мікроскопічними (невидимими неозброєним оком).

Дефекти деталей вузлів тертя наземної техніки мають ряд особливостей, що відрізняють їх від дефектів деталей авіаційної техніки. До таких особливостей відносяться[15]:

- більш інтенсивний вплив навколишнього середовища. Наземна техніка, як правило, експлуатується в більш складних умовах навколишнього середовища, ніж авіаційна техніка. Це пов'язано з тим, що наземна техніка може експлуатуватися в умовах підвищеної температури, вологості, забрудненості повітря та інших несприятливих факторів. Вплив навколишнього середовища може призводити до таких дефектів, як корозія, ерозія, корозійно-механічне зношування, задири, схоплювання тощо;

- більш інтенсивний вплив експлуатаційних факторів. Експлуатаційні фактори, такі як навантаження, швидкість, сила тертя, режим мащення тощо, також мають більший вплив на дефекти деталей вузлів тертя наземної техніки, ніж на дефекти деталей авіаційної техніки. Вплив експлуатаційних факторів може призводити до таких дефектів, як задири, тріщини, пластична деформація, руйнування тощо.

Встановлено [16], що одним із катастрофічних видів зношування є абразивне зношування. Цей вид зношування притаманний деталям шасі ПС, золотниковим парам, гвинтам та іншим деталям авіаційної техніки. В роботі [17] зазначено, що шасі часто піддається зносу, руйнуванню, механічним пошкодженням і ерозії, головним чином спричиненими зіткненням з піском та іншими дрібними частинками, що призводить до деформації та видаленню матеріалу з подальшим зниженням його експлуатаційної ефективності.

1.1.2. Механізми абразивного зношування.

Абразивне зношування, відповідно до ISO 15243, класифікується як зношування, яке проявляється поступовим зніманням матеріалу, зазвичай при наявності забруднюючої речовини, що містить тверді частинки.

Механізм абразивного зношування можна розділити на два основних етапи:

1. Впровадження абразивних частинок у поверхню тертя. Це відбувається під дією прикладеного навантаження та сил тертя, які виникають між абразивною часткою та поверхнею деталі. Впровадження може призвести до пластичних деформацій, руйнування поверхневого шару або навіть до відриву частинок матеріалу.

На цьому етапі відбувається утворення тріщин і задири на поверхні деталі. Тріщини можуть поширюватися вглиб матеріалу, що призводить до його руйнування. Задири можуть призвести до підвищення тиску тертя, що посилює абразивний знос.

2. Пересування абразивних частинок по поверхні тертя. При цьому абразивні частинки можуть дряпати поверхню, зрізати її частинки або навіть повністю руйнувати її.

На цьому етапі відбувається подальше руйнування поверхні деталі. Абразивні частинки можуть зрізати поверхневі шари матеріалу, утворюючи задири та стружку. Стружка може пошкоджувати інші деталі вузла тертя[18].

Інтенсивність абразивного зносу залежить від таких факторів[19]:

- твердості абразивних частинок (чим твердіші абразивні частинки, тим більш інтенсивним є знос);
- твердості матеріалу деталі (чим менше твердість матеріалу деталі, тим більш інтенсивним є знос);
- величини відносної швидкості (чим вища відносна швидкість, тим більш інтенсивним є знос);
- контактного навантаження та сили тертя (зростання зазначених показників інтенсифікує знос);
- наявності змащування (мастильний матеріал забезпечує зменшення сил тертя, рівномірний розподіл контактної навантаження в зоні контакту пар тертя, що знижує інтенсивність абразивного зношування).

Залежно від умов експлуатації, абразивний знос може проявлятися в різних формах. У авіаційній та наземній техніці найбільш поширені такі види абразивного зношування [20]:

– абразивне зношування в результаті прямого контакту абразивних частинок з поверхнею деталі. Цей вид зношування характерний для деталей, які працюють в умовах високої відносної швидкості і сили тертя. До таких деталей належать, наприклад, підшипники ковзання, кулькові та роликові підшипники, шестерні, зубчасті колеса тощо. Даний вид зношування може призвести до погіршення точності роботи вузлів, підвищення рівня шуму та вібрації, а в крайньому випадку - до поломки деталей;

– абразивно-корозійне зношування виникає в результаті взаємодії абразивних частинок з поверхнею деталі, яка має корозійні ушкодження. Даний вид зношування характерний для деталей, які працюють в умовах агресивних середовищ. До таких деталей належать, наприклад, деталі двигунів внутрішнього згоряння, деталі трансмісії,

деталі гідроприводів тощо. Абразивно-корозійне зношування може призвести до значного погіршення стану деталей і навіть до їх повного руйнування;

- абразивно-ерозійне зношування виникає в результаті впливу абразивних частинок, які рухаються з високою швидкістю. Цей вид зносу характерний для деталей, які працюють в умовах високої швидкості потоку абразивних частинок. До таких деталей належать, наприклад, деталі лопаткових машин, деталі газотурбінних двигунів, деталі ракетних двигунів тощо. Абразивно-ерозійне зношування може призвести до значного руйнування поверхні деталей;

- абразивно-корозійно-ерозійне зношування виникає в результаті спільного впливу абразивних частинок та агресивних середовищ. Цей вид зносу характерний для деталей, які працюють в умовах високої швидкості потоку абразивних частинок та агресивних середовищ. До таких деталей належать, наприклад, деталі лопаткових машин, які працюють в умовах високої швидкості потоку абразивних частинок та агресивних газів або рідин.

За умов, коли напруження, що виникають внаслідок удару або ковзання твердих частинок, менші за міцність матеріалу, але вищі за його межу текучості, втрата матеріалу внаслідок одноразового удару не відбудеться [21]. Наприклад, оцінка механізму ерозії в абразивному середовищі еластомерів [22] встановила, що поступова пластична деформація та утворення ребер на зношеній поверхні свідчать про втрату матеріалу з поверхні. У цьому механізмі, в результаті багаторазового удару або ковзання твердих частинок, пластичні деформації накопичуються, утворюючи локалізовані ребра на поверхні поліуретану. Утворені ребра перпендикулярні до напрямку удару або ковзання еродуючих частинок. Встановлено [22], що одноразовий удар еродуючої частинки не призводить до втрати матеріалу з поверхні, і для пошкодження та втрати матеріалу з поверхні в цьому механізмі потрібно багато послідовних ударів. На рис. 1.1 показано типове зображення ребер, що утворилися після випробувань поліуретанового еластомеру на ерозію (стрілка показує напрямок удару). Подальше накопичення пластичних деформацій зрештою призведе до розтріскування на дні нерівностей, а потім

до остаточного відшарування матеріалу від поверхні. Типова тріщина, що утворюється на основі одного з цих виступів, позначена на рис. 1.1,а колом.

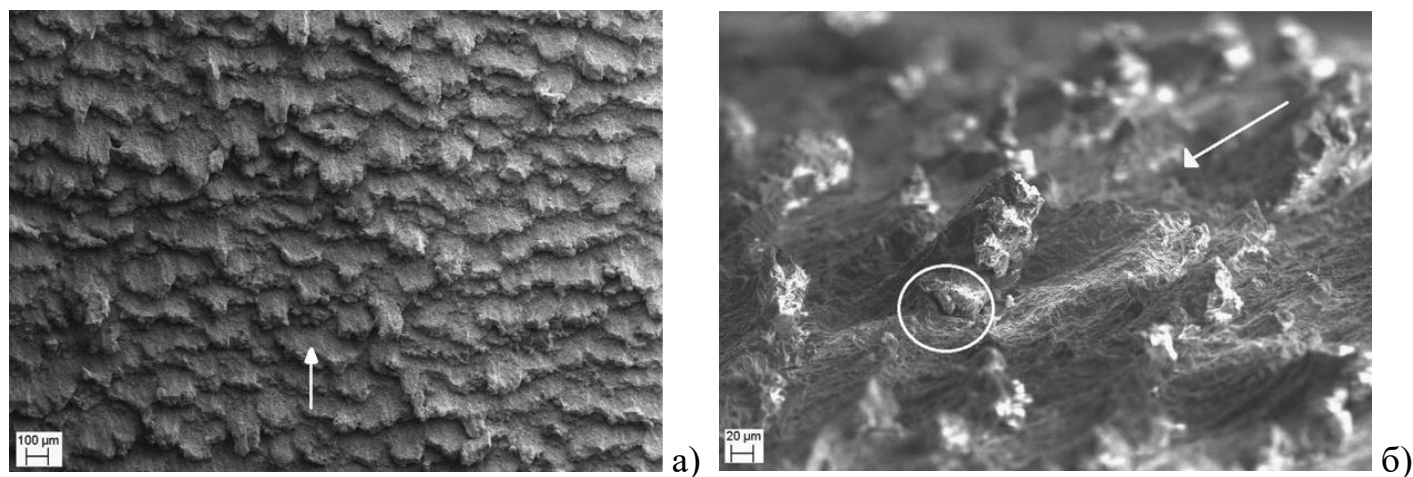


Рис. 1.1. Зображення растрового електронного мікроскопу (РЕМ), отримане з верхньої поверхні поліуретану в результаті абразивно-ерозійного зношування (а) та бічне РЕМ-зображення, отримане з одного з виступів, що утворилися на поверхні поліуретану (б) [22].

Абразивне зношування також може виникнути при нестачі мастильного матеріалу. Як правило, абразивне зношування характеризується тьмним зовнішнім виглядом поверхні. Наприклад, у процесі абразивного зношування підшипників кочення, що може становити до 23% несправностей підшипників (рис. 1.2), зазвичай порушується мікрогеометрія поверхонь. Абразивні частинки можуть швидко зношувати доріжки кочення кілець та тіла кочення, а також виїмки у сепараторах. Причиною абразивного зношування може бути проникнення забрудненого матеріалу в мастило і реалізація граничного режиму мащення в контакті кочення.

Підшипники кочення дуже чутливі до твердих забруднень, які можуть статися навіть під час монтажу підшипника. Забруднення дрібними твердими частинками може видалити матеріал з контактних поверхонь підшипників шляхом надмірного полірування, змінюючи внутрішню геометрію підшипників через абразивне зношування [23].

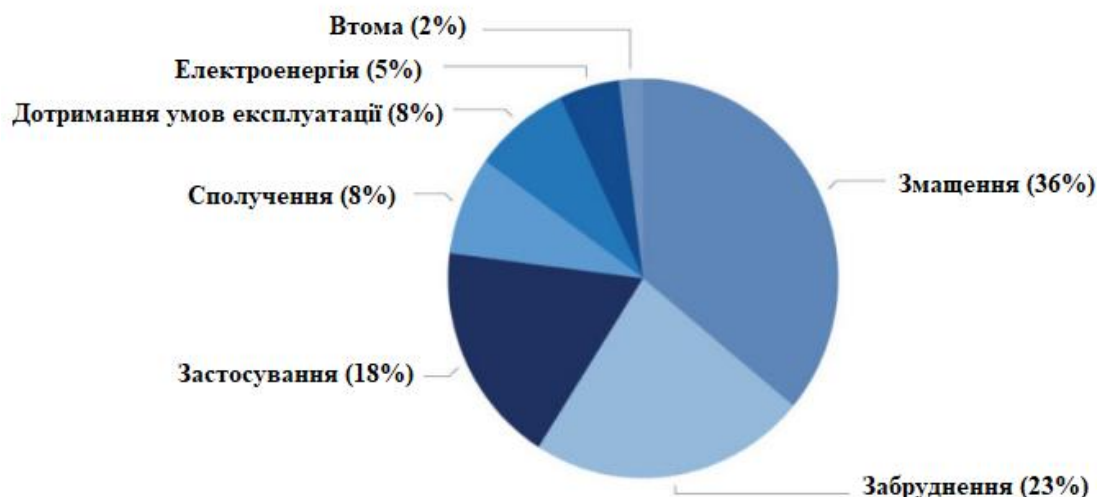


Рис. 1.2. Загальні причини несправності підшипників [23].

Вм'ятини контактних поверхонь (рис. 1.3,а) можуть виникнути, коли тверді та пластичні частинки захоплюються в контактну зону сильно навантажених підшипників і пластично деформують поверхні.

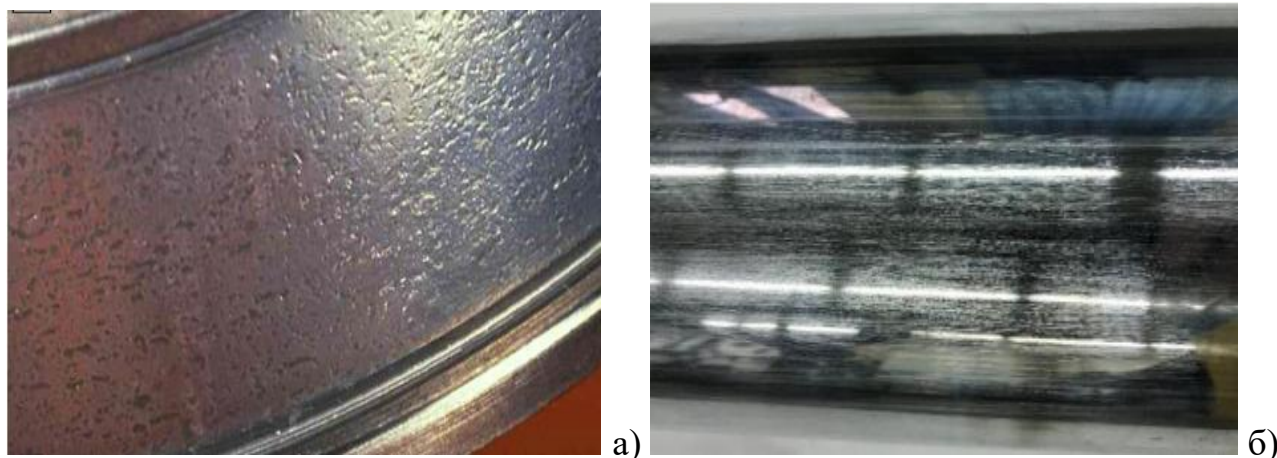


Рис. 1.3. Опорні поверхні підшипників, пошкоджені абразивом, з вм'ятинами (кратерами) на внутрішньому кільці (а) та пошкодження штоку амортизаційної стійки основного шасі літака Ан-32 у результаті абразивного зношування (б).

Вм'ятини, утворені великими пластичними частинками, можуть призвести до виїмок і відколів, тоді як вм'ятини, пов'язані з дрібними пластичними частинками, можуть призвести до відшарування матеріалу з доріжок тертя [24]. Інтенсивний абразивний знос підшипників кочення проявляється у вигляді задирів. На рис. 1.3,б

представлено абразивний знос штоку амортизаційної стійки основного шасі літака Ан-32. Інтенсивне абразивне зношування робочих поверхонь штоку, виготовлених з легированої сталі 30ХГСН2А, обумовлено потраплянням твердих абразивних частинок піску, твердість яких досягає 11...12 ГПа, що призводить до утворення на поверхнях контактуючих деталей подряпин та глибоких рисок.

Традиційно в силових елементах стійки шасі використовують високоміцні вуглецеві сталі у зв'язку з виконанням вимог до максимальної жорсткості таких конструкцій [25]. Вуглецева сталь універсальна і широко використовується в різних галузях промисловості завдяки своїй міцності, довговічності та низькій вартості. Однак вона піддається корозії та зносу, що обмежує термін її служби та продуктивність.

Підсумовуючи аналіз протікання процесів руйнування пар тертя в абразивному середовищі, зазначимо, що швидкість абразивного зносу залежить від таких факторів як [26]:

- концентрації абразивних частинок у зоні тертя;
- розміру абразивних частинок;
- твердості абразиву та матеріалу основи;
- навантажувально-кінематичних параметрів контакту;
- наявності мастильного матеріалу в зоні контакту.

1.2. Методи підвищення зносостійкості вузлів тертя авіаційної техніки.

Конструкційні сталі широко використовуються для виготовлення різних деталей, механізмів і конструкцій в машинобудуванні (підшипники втулок, ущільнення, штоки поршнів, ланцюги, шарніри, болти, вали тощо). Процеси зносу, втоми, корозії та ін. призводять до передчасного виходу з ладу сталевих компонентів [27].

Для зменшення зносу деталей машин та механізмів використовуються різні технології, які можна розділити на кілька основних груп:

1) Технології модифікації поверхні деталей. Ці технології спрямовані на підвищення твердості, міцності та зносостійкості поверхні деталей. До них відносяться[28, 29]:

- термічна та хіміко-термічна обробка (гартування, відпал, азотування, цементация тощо);
- нанесення покриттів (твердих, зносостійких або антифрикційних);
- механічна обробка (шліфування, полірування, дрібоструменева обробка тощо).

2) Технології зміни умов тертя та мащення. Ці технології спрямовані на зменшення навантаження, швидкості тертя, абразивності середовища тощо. До них відносяться [30, 31]:

- розробка раціональних систем змащування вузлів тертя та застосування якісних мастильних матеріалів з присадками або добавками для покращення їх експлуатаційних характеристик;
- використання підшипників або інших конструкційних елементів, які зменшують навантаження на деталі тертя;
- використання засобів захисту деталей від абразивного середовища (фільтри, екрани тощо).

Крім технологічних заходів, для зменшення абразивного зносу застосовуються також превентивні заходи. Ці заходи спрямовані на виявлення та усунення причин, які сприяють виникненню абразивного зношування. До них відносяться:

- регулярний (періодичний) візуальний контроль деталей в процесі експлуатації, що дозволяє своєчасно виявити дефекти, які можуть призвести до абразивного зношування;
- застосування автоматизованих систем контролю, які дозволяють підвищити ефективність контролю деталей і виявити дефекти на ранніх стадіях їх розвитку;
- застосування засобів діагностики, що дозволяють визначити технічний стан деталей і прогнозувати їхній термін служби [32, 33].

Різні методи інженерії поверхні, такі як обробка поверхні та нанесення покриттів, часто використовуються для покращення властивостей поверхні сталевих деталей та продовження терміну їх служби.

До основних методів отримання зносостійких покриттів відносять термічне напилення, плазмове електролітичне/мікродугове оксидування, гальванічне осадження, фізичне та хімічне осадження (PVD та CVD) та ін. [34].

В процесі нанесення зносостійких покриттів важливо враховувати різноманітні параметри процесу, оскільки вони впливають та визначають властивості отриманих покриттів. Оцінка цього впливу є ключовою для досягнення оптимальних характеристик покриття для конкретних застосувань. Розглянемо деякі основні параметри процесу та їхній вплив на властивості зносостійких покриттів [35]:

1. Температура процесу: впливає на структуру і кристалічну орієнтацію покриття. Підвищення температури може сприяти формуванню більш міцних зв'язків та зменшенню внутрішніх напружень.

2. Товщина покриття: може бути сформована залежно від параметрів обраного для модифікування поверхні технологічного процесу. Тонше покриття зазвичай має менший коефіцієнт тертя, але може бути менш стійким до зносу.

3. Швидкість нанесення матеріалу: впливає на щільність та пористість сформованого покриття на поверхні матеріалу основи.

4. Тиск газу або рідини під час нанесення покриття: може впливати на адгезію та компактність покриття. Високий тиск може сприяти кращій адгезії, але важливо уникати можливого пошкодження поверхні.

5. Склад робочого газу або розчинника: може впливати на хімічні властивості покриття (обґрунтований вибір може забезпечити більшу стійкість до корозії або хімічних впливів).

6. Тривалість процесу: може сприяти кращій адгезії і терміну служби покриття, але потребує більше часу та енергії.

7. Вибір матеріалу для покриття: можна заделегідь направлено сформувати склад покриття, керувати його властивостями, додавання легкодоступних елементів може покращити певні характеристики покриття, такі як міцність або стійкість до зносу.

Усі ці параметри взаємодіють між собою, і їхнє оптимальне поєднання визначає кінцеві властивості зносостійкого покриття. Точна оптимізація параметрів процесу є об'єктом досліджень і розвитку в галузі нанесення зносостійких покриттів з метою досягнення найкращої продуктивності та тривалості служби [36].

Через зростаючі вимоги до охорони навколишнього середовища ряд методів, що потребують додаткових дорогих операцій, а саме очищення стічних вод, утилізація небезпечних відходів, втрачають свою актуальність. Перевага надається альтернативним та екологічно чистим методам нанесення зносостійких та корозійностійких покриттів, що є важливим науково-технологічним завданням. Метод електроіскрового легування (ЕІЛ) є екологічно чистим і має ряд переваг: низька вартість, відносна простота, легка автоматизація процесу, висока міцність адгезії покриття, можливість локальної обробки деталей [37].

З метою забезпечення працездатності вузлів тертя АТ рекомендовані різні конструктивні, експлуатаційні і технологічні методи. Що стосується технологічних методів поверхневого зміцнення деталей вузлів тертя, то необхідно відзначити наступне. На сьогодні до найбільш поширених методів поверхневого зміцнення та відновлення зношених деталей відносяться: гальванічні, поверхневого пластичного деформування, наплавлення, хіміко-термічної обробки, плазмового і детонаційного напилення, електроіскрового і лазерного легування, іонної імплантації, комбіновані та ін. Серед перерахованих способів створення зносостійких структур на робочих поверхнях взаємно контактуючих деталей вузлів тертя ЕІЛ, яке відноситься до екологічно чистих технологій, характеризується низькою енергоємністю, простотою процесу, малими габаритами обладнання у поєднанні з високою ефективністю збільшення рівня фізико-механічних властивостей і, зокрема, зносостійкості. Позитивний досвід вітчизняних вчених [38-42] та зарубіжних дослідників [43-45] свідчать про перспективність ЕІЛ як

технологічного процесу при ремонті технічних засобів. Особливо це стосується деталей, які працюють в умовах абразивного зношування.

1.2.1. Загальна інформація про метод електроіскрового легування.

Метод ЕІЛ має довгу історію розвитку. Він розпочав свій шлях як відносно простий спосіб отримання тонких покриттів на металевих деталях.

Перші спроби використання електроіскрового легування відносяться до початку 20-го століття. У 1900-1930 роках науковці проводили дослідження щодо впливу електричних розрядів на металеві поверхні.

У 1950-60-х роках метод електроіскрового легування став предметом патентних заявок та комерційних застосувань. Його використовували для нанесення антикорозійних покриттів на металеві конструкції. У ці роки вченими було розроблено суттєво новий метод обробки металів та сплавів – електроіскрове легування із відомою назвою (Electrospark Deposition, ESD) [46].

З розвитком технологій і наукових досліджень метод електроіскрового легування став більш точним і контрольованим. Вчені розробляли нові матеріали для легування та вивчали властивості різних електродів.

Значний внесок у започаткування та розвиток наукового напрямку цілеспрямованого модифікування поверхневих шарів металевих виробів електроіскровим легуванням внесли вітчизняні зарубіжні вчені В. Р. Лазаренко, Н.І. Лазаренко, А.Д. Верхотуров, Б.Н. Золотих, І.М. Сичов, І.О. Підчерняєва, Б.А. Ляшенко, О.П. Уманський, М.С. Стороженко, С. Barile, С. Casavola, Н. Zhao, Е.Е. Feldshtein, Y. Mao, Y. Xie L., М.С. Wang, R.N. Johnson та ін. [47-51].

По міру розвитку техніки, з появою нових матеріалів, пристроїв та приладів, особливо з розширенням можливостей та підвищенням надійності керуючої електронно-обчислювальної апаратури були створені високопродуктивні та особливо точні електроіскрові обробні комплекси, суттєво розширилася сфера застосування цього способу обробки матеріалів, підвищилася ефективність його використання у

промисловості. Цим і пояснюється безперервне оновлення цього способу та невичерпність його можливостей.

У багаторічному змаганні з іншими способами металообробки електроіскровий спосіб довів свою перспективність, надзвичайну простоту здійснення, малу енергоємність та практично необмежену сферу застосування.

Метод ЕІЛ базується на явищі електричної ерозії та переміщенні матеріалу анода на поверхню катода (деталі) при виниканні імпульсних (іскрових) розрядів у газовому середовищі (повітрі, азоті, аргоні та ін.) [52].

Існує значна кількість досліджень, присвячених методу електроіскрового легування, які охоплюють різні аспекти цього процесу та його застосування в різних галузях.

В роботі [53] розглядаються методи електроіскрового легування, включаючи принципи, процеси та особливості застосування. В даному дослідженні розглядаються різні параметри, які впливають на якість нанесених покриттів. Зазначено, що технологія електроіскрового осадження може ефективно покращити фізичні та хімічні властивості, механічні властивості та трибологічні властивості поверхні, завдяки чому поверхня має високу твердість, високу зносостійкість, високу втомну міцність, високу корозійну стійкість та стійкість до окислення, високу термостійкість, стійкість до абляції та інші спеціальні властивості.

Метою дослідження [54-56] є аналіз аспектів технології ЕІЛ по підготовці до обробки та самого процесу легування сплавів, які зазвичай вважаються складними для зварювання за допомогою традиційних методів із рекомендаціями бездефектного ремонту пошкоджених ділянок і нанесення покриттів.

Спеціальна підготовка матеріалів до обробки ЕІЛ, що передбачає знежирення поверхні підкладки та електрода екстракційним бензином розглядається у дослідженнях [57].

Обробка ЕІЛ для регенерації поверхневого шару реактивних турбін, гідравліки шасі та транспортних засобів по відновленню функціональних властивостей елементів

за відносно низькі витрати та в короткі терміни досліджуються у роботах [58, 59]. Подібним чином, більш широке використання ЕІЛ для створення захисних покриттів для широкого спектру автомобільних деталей, що передбачає зниження витрат в автомобільній промисловості пропонується у дослідженні [59, 60].

Причини дефектів електроіскрового покриття (ЕІП), таких як тріщини та відшарування між матеріалом покриття та підкладкою, є дослідницьким завданням робіт, яке пояснює, чому наразі неможливо створити покриття за допомогою процесу ЕІЛ, яке не містить вказаних дефектів [61-65].

Властивості та характеристики електроіскрового покриття залежать від таких параметрів процесу, як параметри електричних імпульсів, середовище покриття (у повітрі, мастильному матеріалі або захисних газах) та матеріалів, хімічного складу електродів, їх теплоємності та температури плавлення електрода або підкладки. Крім того, на ефективність процесу впливають режими переносу матеріалу – розплавлений глобулярний масоперенос або розпилювальний перенос. Особливо параметри електричних імпульсів дуже ефективні для механізму переносу матеріалу та затвердіння, оскільки вони пов'язані з тепловим потоком та щільністю енергії. Хоча можна збільшити товщину покриття, використовуючи високу енергію імпульсу, на жаль, природа обробки електростатичного розряду не завжди дозволяє отримати максимальну товщину покриття зі збільшенням енергії імпульсу. Тому, щоб збільшити товщину покриття, необхідно знайти ефективні параметри імпульсу обробки, які були б доступні для досягнення максимальної товщини покриття. У цьому контексті в першу чергу необхідно зосередитися на параметрах електричних імпульсів процесу нанесення покриття та часу обробки (або кількості проходів покриття), а також дослідженні впливу властивостей шару покриття на його зносостійкість.

1.2.2. Сутність методу електроіскрової обробки.

Властивості сталевих компонентів можна модифікувати, змінюючи їх хімічний склад або мікроструктуру за допомогою різних зовнішніх джерел енергії, таких як

механічна, термічна або електрична обробка. Серед них електроіскрове легування (ESA) вирізняється своєю здатністю подавати високолокалізовані мікромасштабні енергетичні імпульси без суттєвого впливу на об'ємні властивості основного матеріалу. Це робить ЕІЛ особливо вигідним для прецизійної модифікації поверхні в застосуваннях, де необхідно зберегти структурну цілісність.

Суть методу електроіскрового легування полягає в нанесенні тонкого шару металевого або легувального матеріалу на металеву деталь за допомогою електричного розряду (іскри). Основні етапи та суть методу електроіскрового легування приведено на схемі (рис. 1.4).

Підготовка деталі

Металеву деталь, яку потрібно покращити, ретельно очищають від забруднень, окисів та інших домішок. Поверхня повинна бути чистою та готовою для подальшого оброблення.

Вибір матеріалу

Вибирають легувальний матеріал, який відповідає вимогам задачі. Це може бути метал або спеціальний сплав, який має покращені властивості, наприклад, високу твердість або антикорозійність.

Нанесення іскрового розряду

Деталь розташовується в спеціальному пристрої, а легувальний матеріал - на електроді. Між деталлю і електродом створюється електричний розряд, який призводить до виникнення іскор. Іскри розігрівають поверхню деталі та легувальний матеріал, який розплавляється і наноситься на деталь. Це може бути метал або спеціальний сплав, який має покращені властивості, наприклад, високу твердість або антикорозійність.

Формування тонкого шару

Розплавлений матеріал плавно вкриває поверхню деталі, утворюючи тонкий шар. Величина і кількість іскрових розрядів регулюється, щоб досягти потрібної товщини і рівномірності нанесеного матеріалу.

Контроль параметрів

Параметри, такі як потужність, час роботи, частота інтервалів іскрових розрядів і інші, контролюються для досягнення бажаних результатів.

Обробка і фінішування

Після нанесення легувального матеріалу на поверхню деталі, вона може бути додатково оброблена, наприклад, фрезерувана або шліфувана, щоб досягти потрібної якості та гладкості поверхні.

Рис. 1.4. Основні етапи методу електроіскрового легування.

В процесі легування утворюється розряд, який формує на поверхні катода змінні шари. Ці шари з'являються внаслідок дії імпульсів та теплових навантажень в області розряду. Під дією теплових навантажень на поверхні анода проходить ряд некерованих процесів, а саме: дифузні, мікрометалургійні, термомеханічні та інші. Ці процеси стимулюють переміщення матеріалів анода та катода, що підтримує утворення високої зчеплюваності модифікованого шару з основою.

Спосіб формування легованої поверхні визначається структурою, складом, властивостями матеріалів анодів і технічними характеристиками процесу електроіскрового легування [66]. На рис. 1.5 зображена загальна схема ЕІЛ. Процес виникає при зближенні анода та катода на відстань, яка дорівнює пробою електроіскрового розряду.

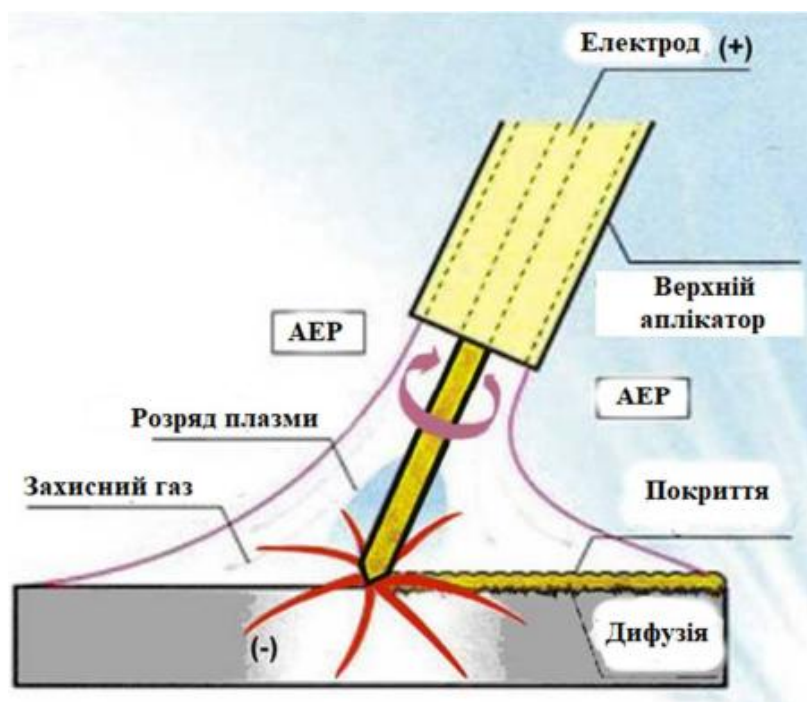


Рис. 1.5. Загальна схема процесу ЕІЛ.

Для того, щоб утворилось суцільне покриття на катоді, переміщення анода повинно бути із швидкістю меншою або рівною імпульсу. Тобто, при частоті 100 Гц, імпульс становить тривалістю 0,01 секунди. Значення тривалості прохідного шляху не

перевищує $\frac{1}{4}$ діаметра проплавлення отвору. Дотримуючись такого режиму обробки, вдається створити монолітне цілісне покриття.

При ЕІЛ у поверхневих шарах катоду (деталі) протікають складні фізико-хімічні процеси, що обумовлено певними особливостями.

По-перше, температура нагрівання поверхні катоду у його мікрооб'ємах перевищує температуру кипіння матеріалу, а тиск ударної хвилі від електричного розряду досягає значення 7-10 кг/мм².

По-друге, змінюється фазовий склад поверхневого шару у результаті перенесення матеріалу анода. Тобто структурні зміни у поверхневих шарах деталі відбуваються у результаті багаторазового впливу зазначених чинників, а також зовнішнього середовища, що взаємодіє із нагрітим металом.

Структура покриття та його фізико-хімічні властивості суттєво відрізняються від основного матеріалу деталі.

Глибина і твердість зміцненого шару залежить від потужності режиму зміцнення. При потужності 1 кВт загальна глибина зміцненого шару досягає 0.12 мм, а при 17 кВт - 5 мм. Твердість поверхні, яка зміцнена, наприклад, ферохромовим електродом, досягає HV650 [67].

Досягнення позитивних наслідків обробки ЕІЛ залежить від доцільного вибору анода з урахуванням його фізико-хімічних властивостей, ерозійної стійкості та параметрів обробки, які мають суттєвий вплив на характеристики майбутнього модифікованого шару.

В якості анода (електродів) використовують легкосплавні метали, полі-, монокристали перехідних металів IV-VI груп, їх сполуки з бором, вуглецем, азотом, а також стандартні тверді сплави [68].

Метод ЕІЛ дає змогу на поверхні, яка потребує обробки, змінити деякі властивості, а саме: збільшити корозійну стійкість, жаро- та зносостійкість, твердість деталей машин і механізмів у результаті формування потрібних хімічних сполук та шарів з необхідною шорсткістю [69].

Перед застосуванням електроіскрового легування необхідно провести пробні операції. Це дозволить обрати правильний режим роботи під необхідний електрод. Наприклад, як показано в дослідях [70], при використанні вольфраму спостерігається приварка анода і катода. Даний негативний момент можливо запобігти попереднім легуванням вуглецем. Перед покриттям алюмінію карбідом вольфраму, необхідно створити проміжний шар з нікелю.

Як зазначається у роботі [71] у більшості випадків ЕІЛ покриття наносились на залізовуглецеві сталі, проте за останні 5-10 років інтенсивно проводяться наукові дослідження з ЕІЛ легких сплавів [72, 73].

Дослідження, присвячені ЕІЛ сплавів на основі алюмінію, титану та інших легких металів свідчать про особливості технологічного процесу.

Так, наприклад, ЕІЛ алюмінієвих сплавів традиційними компактними електродними матеріалами (металами, їх сплавами та металоподібними тугоплавкими сполуками) супроводжується інтенсивною електроерозією катода з втратою маси деталі, на яку наноситься покриття, що обумовлено невисокою (низькою) температурою плавлення алюмінію.

З метою удосконалення технологічного процесу ЕІЛ алюмінієвих сплавів у якості електродних матеріалів використовують порошкові суміші, що дозволяє у процесі іскрового розряду часткову втрату енергії у міжелектродному проміжку, при цьому забезпечується приріст маси катода (деталі) [74].

В Інституті проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України розроблені компактні електродні матеріали [75, 76], при електрозії яких у міжелектродному проміжку виникає пар і частинки діелектричних компонентів, що сприяє утворенню екрануючої "хмари" над поверхнею алюмінієвим катодом, при цьому пригнічується його ерозія. В роботі [77] встановлено, що для збільшення терміну служби модифікованих ЕІЛ поверхонь пропонується формувати на поверхні зносостійкі переривчасті покриття. Пропонується вибирати розміри дискретної ділянки покриття на основі розрахунку критичної відстані між тріщинами при когезійному розтріскуванні. Такий підхід

враховує залишкові напруження в покритті. Було показано, що в умовах контактного навантаження такі покриття запобігають контактному руйнуванню завдяки зменшенню залишкових напружень.

Метод електроіскрового легування має як переваги, так і недоліки, які залежать від конкретного застосування і обставин.

До основних переваг ЕІЛ конструкційних матеріалів можна віднести:

- ЕІЛ дозволяє покращити зносостійкість деталей і збільшити їхній термін служби;
- метод може використовуватися для відновлення пошкоджених чи зношених деталей, замість їхньої повної заміни;
- електроіскрове легування дозволяє точно регулювати товщину і розмір нанесеного покриття;
- висока міцність зчеплення нанесеного матеріалу з матеріалом основи (за рахунок механічного перемішування і взаємного дифузійного проникнення легуючих матеріалів у шар, який формується);
- відсутність нагрівання деталі в процесі легування, що не призводить до зміни її фізико-механічних властивостей і геометрії;
- ЕІЛ дозволяє зменшити витрати матеріалу, оскільки матеріал наноситься тільки там, де необхідно для зміцнення/відновлення;
- енергоємність процесу ЕІЛ в 100 раз менше, ніж для плазмового напилення, можливість зміцнення окремих ділянок деталі на місці без розбирання всього агрегату;
- технологічний процес екологічно чистий, «сухий» і простий; обладнання малогабаритне, мобільне і транспортабельне;
- можливість відновлення зношених деталей за епурою зносу диференціальними дискретними покриттями змінної суцільності;
- поверхня, яка оброблюється, не потребує попередньої підготовки;
- можна використовувати різні легуючі матеріали для покращення певних властивостей деталей;
- метод ЕІЛ широко використовується в авіації, автомобільній промисловості,

енергетиці, нафтогазовій галузі, машинобудуванні та інших сферах.

Однак, даному методу притаманні і недоліки, які можна зазначити в наступних тезах:

- низька продуктивність ЕІЛ – процес може бути повільним і тривалим, особливо для великих поверхонь, що обмежує його масове застосування;
- формування нерівномірного покриття – важко досягти ідеально рівномірної товщини та структури шару по всій поверхні, що вимагає подальшої механічної обробки;
- можлива низька адгезія (зчеплення) – залежно від матеріалу аноду/катода спостерігається слабе зчеплення між легуючим шаром і основним матеріалом, що може призвести до відшарування;
- можливе утворення поверхневих дефектів – високі локальні температури при технологічному процесі можуть спричиняти утворення мікротріщин, пористість або зміну структури основи.

Резервом для підвищення якості електроіскрових покриттів (ЕІП) трибологічного призначення можуть бути комбіновані технології: рекомендовано після ЕІЛ застосовувати поверхнєве пластичне деформування, безабразивну ультразвукову фінішну обробку, лазерну обробку або використовувати графіт в якості катода у разі ЕІЛ на заключних операціях обробки [78].

Згідно [79], дослідження електроіскрового осадження в основному зосереджено на тому, як визначити взаємозв'язок між параметрами процесу і товщиною осадження і як збільшити товщину осадження, а дослідження параметрів процесу осадження в основному зосереджено на обмежених керамічних або цементованих карбідних матеріалах осадження, іскрової ємності, напруги, та питомого часу осадження. Осаджений матеріал при ЕІЛ містить компоненти сплаву, отримані в результаті поєднання електрода, підкладки та середовища під час процесу затвердіння. ЕІЛ включає ефективний розряд накопиченої енергії в електричному конденсаторі, що призводить до швидкого повторного затвердіння локальних розплавлених областей в

мікронному масштабі протягом 10-100 мікросекунд. Наприклад, в роботі [80] проаналізовано, що найбільшою зносостійкістю будуть володіти деталі, оброблені методом ЕІЛ у режимі з ємністю конденсаторної батареї $150 \pm 15 \text{ мкФ}$, частотою вібрації електроду $250 \pm 50 \text{ Гц}$ із застосуванням електроду Т15К6 внаслідок формування ЕІП з мікротвердістю поверхні 15,2 ГПа. Досягнення високої зносостійкості деталей, оброблених у режимі ємності конденсаторної батареї $330 \pm 30 \text{ мкФ}$, частота вібрації електроду $125 \pm 25 \text{ Гц}$ із застосуванням електроду ВК8, забезпечується поєднанням високої поверхневої мікротвердості ЕІП (13,5 МПа) та залишкових напружень стиску на рівні -90 МПа.

Залежно від типу матеріалу та параметрів процесу, які використовуються в процесі ЕІЛ, швидкість охолодження може досягати $105\text{--}109 \text{ }^\circ\text{C/с}$ [81]. Таке швидке охолодження може призвести до утворення аморфних та наномасштабних фаз на поверхні. У роботі [82] обґрунтовано застосування технології відновлення зношених валів турбокомпресорів автомобіля шляхом нанесення нових електроіскрових покриттів на основі електроерозійних наноматеріалів, що сприяє покращенню фізико-механічних властивостей електроіскрових покриттів. Визначено, що дане ЕІП підвищує антифрикційні властивості трибосистеми в 3,3 рази при абразивному зношуванню з фракцією 0,1...0,4 мм та підвищує ресурс валів турбокомпресорів, відновлених за рекомендованою технологією, у 1,5 рази.

В роботі [83] зазначено, що формування ЕІП визначається умовами переносу й кристалізації металу: градієнт структур по товщині покриття значною мірою обумовлений розвитком процесів структурних перетворень, подібних впливові термічного характеру. Авторами встановлено, що за умови однакового металу анода і катода (на прикладі вуглецевої сталі за хімічним складом 0,65 % С, 0,67 % Мп, 0,3 % Si, 0,027 % Р, 0,028 % S) ефект поверхневого зміцнення від іскрового розряду може бути конкурентноспроможним більшості термічних та хіміко-термічних технологій обробки поверхні металевих матеріалів.

Зменшення витрат матеріалу та енергії в процесі ЕІЛ сприяє зменшенню викидів

та відходів, що відповідає сучасним екологічним стандартам та допомагає знизити вплив промисловості на навколишнє середовище. Розвиток нових матеріалів та високоефективних технологій робить ЕІЛ ще більш актуальним для покращення зносостійкості деталей та отримання нових можливостей для їхнього вдосконалення [84]. Усі вищезазначені чинники роблять метод ЕІЛ важливим і актуальним для вирішення завдань підвищення зносостійкості деталей у різних галузях і сферах виробництва.

1.3. Матеріали для відновлення та зміцнення деталей авіаційної техніки при експлуатації в абразивному середовищі.

Для зменшення абразивного зношування деталей проводяться активні дослідження, направлені на розробку нових матеріалів та покриттів, які мають підвищену зносостійкість. До таких матеріалів відносяться, зокрема, композиційні матеріали, наноструктуровані матеріали та матеріали з унікальними властивостями, наприклад, з ефектом самозагоєння[85].

1.3.1. Вимоги до вибору зносостійких матеріалів.

В широкому навантажувально-швидкісному діапазоні в режимі тертя ковзання в умовах реалізації сухого режиму мащення застосування тугоплавких сполук та композиційних матеріалів на їх основі є найбільш ефективним при експлуатації в абразивному середовищі.

Найбільш розповсюдженими матеріалами даного класу є тверді сплави систем WC–Co, WC–TiC–Co, TiC–Ni–Mo, Cr₃C₂–Ni, TiCN–Ni, які застосовуються при модифікуванні поверхні конструкційних матеріалів для підвищення їх зносостійкості. В роботі [86] зазначається, що матеріали на основі карбіду вольфраму (WC) характеризуються високою міцністю і зносостійкістю, але мають велику щільність ($\rho \approx 15 \text{ г/см}^2$), що робить їх достатньо дорогими. Матеріали на основі тугоплавких сполук титану і хрому мають кращу жаростійкість, твердість, невелику щільність ($\rho \approx 4 - 7$

г/см²), але поступаються по міцності. Це пов'язано як з нижчими значеннями міцності вихідних сполук TiC, Cr₃C₂, TiB₂ у порівнянні з WC, так і неоптимальним вибором складу металевої зв'язки.

У зв'язку з розвитком методів зміцнення, розробкою нових зносостійких покриттів та появою ефективних методів поверхневої обробки матеріалів, що забезпечують отримання заданого комплексу характеристик поверхневої міцності, з'являються можливості підвищення зносостійкості традиційних конструкційних матеріалів. Зокрема, при ЕІЛ залежно від експлуатаційного призначення модифікованої деталі, використовувані електродні матеріали можна розділити на три категорії [87].

1) зносостійкі матеріали, до складу яких входять тверді карбіди W, Ti, Cr, Ta, Mo, Hf, Zr, Nb, V та ін., сплави для наплавлення з високим вмістом нікелю, хрому, бориди Ti, Zr, Ta, інтерметалічні сполуки та металокераміки;

2) корозійно-стійкі матеріали, до яких належать неіржавна сталь, інтерметаліди Fe, Ni та Ti з Al, багатокомпонентні сплави FeCrAlY, NiCrAlY, CoCrAlY;

3) матеріали для відновлення або модифікування зношеної поверхні: сплави на основі нікелю або кобальту, благородні метали (Au, Ag, Pt, Ir, Pd і Rh), тугоплавкі метали (W, Mo, Ta, Re, Nb і Hf та їх сплави) та сплави Fe, Ni, Cr, Co, Al, Ti, Cu, Zr, Zn, V, Sn та ін.

Високою зносостійкістю характеризуються тверді покриття, такі як нітрид бору (BN), алмазоподібні покриття (DLC), нітрид кремнію (Si₃N₄), а також покриття на основі титану, алюмінію та інших матеріалів [88]. Ці покриття відзначаються високою твердістю, стійкістю до зношування та хімічними впливами, а також мають добру теплопровідність. Наприклад, нітрид бору використовується у високотемпературних умовах, де інші покриття можуть недостатньо стійкі.

У багатьох випадках, використання зносостійких покриттів є досить складним завданням, яке вимагає ретельного вибору матеріалу та методу нанесення відповідно до конкретних умов експлуатації. Також важливо враховувати специфічні властивості

матеріалів, що знаходяться в контакті, а також вимоги до тривкості, ефективності та терміну служби системи.

Зносостійкі матеріали є складовими зносостійких покриттів і відіграють важливу роль у зменшенні тертя та зносу між поверхнями. При виборі зносостійкого матеріалу необхідно враховувати ряд важливих властивостей матеріалу покриття, які впливають на ефективність покриття і експлуатаційну надійність механічних систем в цілому [89, 90]:

1) Обґрунтування вибору твердості покриття: однією з ключових властивостей зносостійких матеріалів є їхній рівень твердості. Матеріали з високою твердістю менше піддаються зносу та подряпинам в умовах інтенсивного тертя. Наприклад, алмази (DLC) і нітрид бору (BN) відзначаються високою твердістю і довгим терміном служби.

2) Антифрикційні властивості: матеріали з низьким коефіцієнтом тертя допомагають зменшити опір руху і тертя між поверхнями, що призводить до зменшення зносу та підвищення ресурсу трибосистеми.

3) Температурний діапазон роботи трибосистеми: оскільки багато трибомеханічних систем працюють при високих температурах, то зносостійкі матеріали повинні бути стійкими до впливу високих температур і не втрачати свої властивості в екстремальних умовах. При експлуатації деталей в умовах високих температур важлива хороша теплопровідність покриттів. Висока теплопровідність може допомогти розсіювати тепло та підтримувати оптимальну температуру.

4) Експлуатація в агресивному середовищі: матеріали повинні бути стійкими до хімічних впливів, особливо в агресивних середовищах. Це особливо важливо в хімічній промисловості та лабораторних дослідженнях.

5) Вибір зміцнюючих фаз та формування мікроструктури покриття: найвищі показники зносостійкості забезпечують покриття з карбідів вольфраму (WC), титану (TiC) та боридів. Наноструктуровані покриття працюють значно довше за рахунок рівномірного розподілу навантаження. Додавання вільного вуглецю в електрод запобігає розпаду карбідів (декарбюризації), що критично для збереження

зносостійкості при високих температурах. Оптимальна шорсткість для максимальної зносостійкості зазвичай становить 3–3.5 мкм. Перевищення цього порогу (понад 5 мкм) призводить до різкого зниження довговічності через механічне сколювання виступів.

1.3.2. Матеріали для виготовлення електродів для електроіскрового легування.

Матеріали, які використовуються для електродів при електроіскровому легуванні, повинні мати високу теплопровідність і міцність, а також здатність до довготривалої роботи в умовах високої температури і інтенсивних іскрових розрядів. Основні матеріали які використовуються для електродів в ESD приведено нижче.

Мідь є одним із найпоширеніших матеріалів для виготовлення електродів в ESD. Вона має високу теплопровідність і міцність, що робить її ефективним вибором для багатьох випадків. Мідь достатньо добре переносить високі температури та іскрові розряди.

Мідно-сурмові сплави (наприклад, Cu-Be) відзначаються високою міцністю і теплопровідністю. Вони можуть використовуватися для виготовлення електродів, які піддаються великим навантаженням і високим температурам.

Вольфрам має дуже високу точку плавлення і теплопровідність, що робить його відмінним вибором для електродів в умовах високих температур і інтенсивних іскрових розрядів. Він використовується, зокрема, для електродів, призначених для важких умов.

Молібден має подібні властивості до вольфраму, включаючи високу теплопровідність і міцність. Цей матеріал також використовується для виготовлення електродів в ESD.

Алмазні покриття можуть бути застосовані на поверхні електродів для покращення їхньої зносостійкості та стійкості до іскрових розрядів. Алмазні покриття відзначаються високою твердістю і антикорозійністю.

Вибір матеріалу для електродів в методі електроіскрового легування залежить від конкретних вимог, включаючи температурні умови, навантаження, властивості

легувального матеріалу та інші фактори. Наприклад, аналіз покриття WC-Co на сталі H13 виявив, що при збільшенні енергії іскри збільшується твердість і товщина покриття, параметри процесу електроіскрового легування мають взаємодіючий вплив на властивості покриття, і існує оптимальна умова для досягнення надійного покриття [91].

Приклади матеріалів для електродів, що застосовуються для нанесення покриттів за допомогою електроіскрового легування, в залежності від призначення одержуваного покриття, приведено у табл. 1.2

Таблиця 1.2

**Матеріали для електродів, що застосовуються для нанесення
електроіскрових покриттів**

Матеріал електроду (анод)	Матеріал для катоду	Очікувані результати для покриття
Мідь (Cu)	ВК8, сталі 3 та ХВГ, Al	Збільшення тепловіддачі, корозійної стійкості
TiAl, Al, Ni ₃ Al	ВК8, сталі 3 та ХВГ, Al, Титанові сплави	Збільшення окалинотійкості, зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості
Хром (Cr)	ВК8, Сталі 40Х, 45, ХВГ тощо	Збільшення зносостійкості, жаростійкості, окалинотійкості
Графітні електроди	Т15К6, сталі Р18, ХВГ, 25 та інші	Збільшення зносостійкості, стійкості різального інструменту
Мо	Сталі 30, 45, ХВГ тощо	Збільшення стійкості різального інструменту та корозійної стійкості.
Ni, NiCr	Сталі 45, 40Х, ХВГ тощо	Збільшення зносостійкості, жаростійкості, окалинотійкості

До основних властивостей при формуванні зносостійких покриттів на сталевих деталях відносять високу твердість, стійкість до зносу, тріщиноутворення та ін. Важливою відмінною рисою методу ЕІЛ є відсутність значного нагрівання підкладки, на яку наноситься захисне покриття. Це дозволяє виключити утворення зон термічного впливу в підкладці, які призводять до утворення внутрішніх напружень, що спричиняють розтріскування покриття та знижують його фізико-механічні характеристики [92].

Ефективність методу ЕІЛ при нанесенні захисних покриттів базується на використанні високоякісних електродних матеріалів. Наприклад, результати випробувань на знос нержавіючої сталі Cr18Ni10Ti, зміцненої електроіскровими покриттями (ЕІП) з тугоплавких металів та графіту, свідчать що всі електроіскрові покриття проявляють вищу зносостійкість, ніж сталь Cr18Ni10Ti в вихідному стані [93]. Рентгеноструктурний аналіз виявив формування на поверхні легованої сталі ЕІП молібдену, вольфраму, карбідів титану, нітриду титану та інтерметаліду нікель-титану, що збільшило мікротвердість від 4,9 до 8 разів, а зносостійкість – від 1,63 до 29 разів.

В роботі [94] встановлено локальне зміцнення поверхневого об'єму матеріалу деталей на глибину 10 – 40 мкм та підвищення поверхневої твердості сталі з структурою сорбіту до HV 600 – 650 при електроіскровому легуванні вольфрамом та хромом. Визначено, що зносостійкість зміцнених електроіскровим легуванням деталей збільшується в 1,3 рази порівняно з вихідним станом.

В роботі [95] зазначено, що серед евтектичних сплавів, що рекомендуються для покриття методом ЕІЛ, згідно з їхніми фізико-механічними характеристиками, основне місце займають матеріали системи Fe-Mn-C-B, леговані різними добавками, що підвищують їхню твердість, корозійну стійкість та зносостійкість. Однак, недоліками зазначених систем є те, що під час синтезу цих покриттів у їх структурі з'являються такі шкідливі домішки, як сірка, кисень, фосфор та інші, що значно знижує рівень експлуатаційних характеристик покриттів через їхню крихкість.

Як зазначено в [96], традиційними електродними матеріалами для ЕІЛ є метали та

їх сплави – для збільшення адгезії, однорідності та товщини покриттів; карбідні композиційні матеріали на основі переважно вольфраму та сполук титану – для збільшення твердості поверхневих шарів. Останнім часом спостерігається тенденція до використання в якості електродів композиційних матеріалів на основі неметалевих тугоплавких надтвердих сполук, таких як B_4C , AlN , Al_2O_3 тощо, але їх висока крихкість обмежує їх використання.

Таким чином, вибір складу електродного матеріалу є визначальним для комплексу трибологічних та механічних властивостей покриттів та терміну їх служби. В даній роботі вибір матеріалу електроду ґрунтувався на одержанні такого ЕПІ на конструкційних сталях, яке б забезпечувало високі протизношувальні властивості в абразивному середовищі.

1.4. Математичні моделі динамічної взаємодії в системі «абразивна частка – деталь».

Сучасні дослідження динамічної взаємодії в системі «абразивна частка – деталь» базуються на фундаменті класичної трибології та моделях коливань.

У рамках математичної моделі оцінки зношування вузлів авіаційної та наземної техніки необхідно визначити один з показників – зміну лінійних розмірів, геометричної форми та маси об'єктів тертя, що надає можливість ввести наступні поняття [97]:

- лінійний показник зношування (LW: Linear Wear), що визначається максимальною глибиною дефекту h_W , який виник внаслідок зносу;
- об'ємний показник зношування (VW: Volumetric Wear), що визначається через об'єм втрат V_W матеріалу вузла внаслідок зносу;
- ваговий показник зношування (WW: Weight Wear), що визначається через масу втрат m_W матеріалу вузла внаслідок зносу.

На основі зазначених показників можна розрахувати відповідні значення для інтенсивності зношування: інтенсивність лінійного зношування I_{LW} ; інтенсивність об'ємного зношування I_{VW} ; інтенсивність вагового зношування I_{WW} .

Відповідні значення на аналітичному рівні можуть бути вирішені як співвіднесення диференціалів глибини дефекту h_W , об'єму втрат V_W і масу втрат m_W і шляху тертя ковзання l_R , або апроксимовані як швидкість зношування $\{v_{LW}, v_{VW}, v_{WW}\}$ відповідно добутку кількості робочих циклів N_C і часу одного циклу t_C [98]:

$$\begin{cases} I_{LW} = \frac{dh_W}{dl_R} \\ I_{VW} = \frac{dV_W}{dl_R} \\ I_{WW} = \frac{dm_W}{dl_R} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} v_{LW} \sim \frac{h_W}{N_C \cdot t_C} \\ v_{VW} = \frac{V_W}{N_C \cdot t_C} \\ v_{WW} = \frac{m_W}{N_C \cdot t_C} \end{cases} . \quad (1.1)$$

Набори показників $\{I_{LW}, I_{VW}, I_{WW}\}$ і $\{v_{LW}, v_{VW}, v_{WW}\}$ визначають клас зносостійкості матеріалу відповідно стандартів. Аналіз наукових публікацій [99-102] показує, що як для визначення та розрахунку цільових функцій математичної моделі процесу зношування необхідно визначити тип зношування відповідно до класифікації (механічне зношування, молекулярно-механічне зношування або корозійно-механічне зношування).

Базовою характеристикою, яка визначає особливості тертя є поверхнева енергія, що виникає внаслідок наявності вільних зв'язків приповерхневих атомів. Відповідно до значення поверхневої енергії фізичні характеристики процесу тертя гладких поверхонь можуть бути промодельовані на рівні адгезії (молекулярні зв'язки неоднорідних поверхонь) або когезії (молекулярні зв'язки однорідних поверхонь). Крім того слід врахувати наявність на поверхні вузла молекулярної або мультимолекулярної плівки молекул газу, рідини чи залишків твердих речовин, що моделюється як адсорбція або як хемосорбція при включенні хімічних реакцій, що впливають на проходження процесу. Адсорбція сприяє зменшенню рівня адгезії поверхонь через зменшення поверхневої енергії. Базова модель визначення фізико-хімічних властивостей поверхонь оцінюється на рівні явищ адгезії/когезії та адсорбції/хемосорбції. У залежності від матеріалу поверхні вузлів тертя авіаційної техніки може бути визначена поверхнева активність, а відповідно і зменшення сили тертя і стійкість до деформування об'єкту контролю. У

більшості наукових публікацій за зазначеною тематикою моделюються процеси окислення металевих поверхонь [103, 104]. У дослідженнях зазначається збільшення стійкості матеріалу при наявності окислу (наприклад для Al_2O_3 і SiO_2) [105]. Як показано у наведених публікаціях математичні моделі на основі явищ адгезії/когезії та адсорбції/хемосорбції дозволяють побудувати цілісну методологію виникнення дефектів у авіаційних вузлах, а також провести прогнозування їх поширення за допомогою методик, що базуються на алгоритмі регресії, заснованої на опорних векторах (SVR: Support Vectors Regression) для широкого набору матеріалів, що використовуються у авіаційній техніці.

У свою чергу, визначення механічних характеристик поверхонь авіаційних вузлів базуються на значенні межі міцності (TS: Tensile Strength), межі плинності (YP: Yield Point), модуль пружності (EM: Elastic Modulus) першого і другого роду, показник твердості матеріалу (MH: Material Hardness) як набори $\{\sigma_{TS}\}$, $\{\sigma_{YP}, \tau_{YP}\}$, $\{\varepsilon_{EM}^I; \varepsilon_{EM}^II\}$ і $\{\theta_{MH}\}$, відповідно. Характерно, що механічні властивості матеріалу змінюються в залежності від глибини, причому найбільша неоднорідність характерна для поверхневих і приповерхневих шарів (включно з граничним шаром адсорбованої плівки), що має бути враховано при моделюванні швидкості тертя, навантаження і температурного впливу у процесі експлуатації, а також наявності залишкових напруг. На рівні математичної моделі властивості поверхневих і приповерхневих шарів елементу описується через функцію градієнту механічних властивостей (MPG: Mechanical Properties Gradient), що характеризує залежність інтенсивності зміни вказаних механічних характеристик [106].

Традиційна трібологія розглядає знос як статичний процес, тоді як механізм абразивного зношування свідчить, що це високочастотний коливальний процес, де домінуючим фактором руйнування є резонансна енергія, що руйнує структуру матеріалу «зсередини».

Суть проблематики полягає у тому, що руйнування поверхні відбувається не лише через механічне дряпання, а внаслідок втрати динамічної стійкості мікроб'ємів металу.

Основні аспекти цього механізму руйнування полягають в наступному:

1) коли поздовжні зусилля від абразивної частки перевищують зусилля Ейлера (перевищення критичного навантаження), поверхневий шар втрачає здатність зберігати форму, що призводить до миттєвого вигину матеріалу перед часткою [107]. Попереду частки створюється зона, де матеріал знаходиться у критичному стані. Будь-яке незначне коливання в цій зоні призводить до відділення стружки або викришування [108];

2) сила тертя не є константою; вона періодично змінюється через зміну мікрогеометрії поверхонь при експлуатації. Ця періодичність діє як «параметричне навантаження», яке розхитує систему [109];

3) якщо частота зміни сили тертя збігається з власною частотою коливань поверхневого шару, виникає параметричний резонанс. При цьому амплітуда деформаційних хвиль різко зростає, що спричиняє: хвилеутворення в поверхневих шарах матеріалу, мікротомне руйнування через циклічне перенапруження, зрізання деформованого об'єму матеріалу, що призводить до інтенсивного зношування [110].

Дослідження параметричного резонансу та динамічної нестійкості в зоні контакту абразивної частинки з поверхнею деталі має критичне значення для авіаційної та наземної техніки, оскільки дозволяє розкрити глибинні фізичні механізми передчасного виходу з ладу високонавантажених вузлів. Традиційні підходи до розрахунку зносостійкості часто ігнорують коливальні процеси, проте в реальних умовах експлуатації, особливо в авіаційних двигунах або паливних системах, деталі працюють під дією високочастотних вібрацій та екстремальних швидкостей. Коли поздовжні зусилля, що діють на мікрооб'єми поверхневого шару, перевищують критичне зусилля Ейлера, матеріал втрачає стійкість, що призводить до формування деформаційних хвиль попереду абразиву. Виникнення областей динамічної нестійкості провокує параметричний резонанс, за якого амплітуда коливань різко зростає, спричиняючи інтенсивне зрізання матеріалу та мікротомне руйнування. Для наземної техніки, що працює в умовах сильної запиленості, такі дослідження є основою для створення нових зносостійких матеріалів, здатних гасити ці хвилі. В авіації ж розуміння частотних зон

нестійкості дозволяє уникнути катастрофічних поломок лопаток турбін та інших прецизійних елементів, де навіть мікронна зміна геометрії через «резонансне» зношування може призвести до розгерметизації або втрати балансу всієї системи, що підтверджується сучасними моделями. Таким чином, перехід до динамічного аналізу взаємодії в абразивному середовищі є необхідним етапом підвищення надійності та ресурсу сучасної техніки.

Висновки до розділу 1.

1. Проаналізовано основні види пошкоджень та відмов вузлів тертя авіаційної та наземної техніки, визначено, що інтенсивність абразивного зношування вузлів тертя авіаційної (деталі шасі, зокрема штоки амортизаційних стійок, золотникові пари, підшипники кочення) та наземної техніки (деталі двигунів внутрішнього згоряння, трансмісії, гідроприводів, а також робочих органів, що контактують із ґрунтом) залежить від концентрації та розміру абразивних частинок, їх твердості відносно матеріалу основи, навантажувально-кінематичних параметрів контакту та наявності мастильного матеріалу.

2. Проаналізовано існуючі методи підвищення абразивної стійкості вузлів тертя, які поділяються на технології модифікації поверхні (термічна/хіміко-термічна обробка, нанесення покриттів), зміни умов тертя та мащення, а також превентивні заходи контролю. Одним із перспективних напрямків є розробка нових матеріалів та покриттів, які мають підвищену зносостійкість. Впровадження інноваційних розробок у галузі матеріалів та покриттів дозволить значно зменшити абразійний знос деталей вузлів тертя авіаційної та наземної техніки, що призведе до підвищення їхньої надійності та довговічності.

3. Обґрунтовано перспективність застосування методу електроіскрового легування як екологічно чистої, низьковитратної та високоефективної технології для зміцнення та відновлення зношених деталей, зокрема тих, що працюють в умовах абразивного зношування. Електроіскрове легування дозволяє наносити зносостійкі та

корозійностійкі покриття з високою адгезією без суттєвого нагрівання об'ємного матеріалу, що зберігає його структурну цілісність.

4. Виявлено, що властивості та характеристики електроіскрових покриттів значною мірою залежать від параметрів процесу (енергії імпульсів, тривалості обробки, середовища) та матеріалів електродів, що дозволяє цілеспрямовано формувати необхідний комплекс властивостей поверхневого шару, таких як висока твердість та зносостійкість.

5. Вибір матеріалу електрода є визначальним для кінцевих властивостей покриття: для забезпечення високої зносостійкості в абразивному середовищі найефективнішим є використання електродів на основі тугоплавких сполук, зокрема карбідів вольфраму (WC), титану (TiC) та боридів. Наноструктуровані та композиційні матеріали на основі карбідів і нітридів характеризуються найвищими показниками зносостійкості та ефективні в широкому діапазоні температур і агресивних середовищ, що підтверджує актуальність їх застосування у вигляді покриттів для підвищення ресурсу деталей.

6. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку математичних моделей динамічної взаємодії в системі «абразивна частка – деталь», що дозволяє врахувати високочастотні коливальні процеси та параметричний резонанс як домінуючі фактори руйнування, які ігноруються традиційними статичними моделями зносу.

На основі зазначених висновків сформульована **мета роботи**, яка полягає в обґрунтованому виборі методу зміцнення поверхні елементів трибоспряження композиційними покриттями з формуванням оптимальних фізико-механічних властивостей покриття-основа для підвищення їх зносостійкості в абразивному середовищі.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити **наступні завдання**:

– проаналізувати ключові фактори, що спричиняють абразивне зношування вузлів тертя авіаційної та наземної техніки;

- вибрати раціональні шляхи управління експлуатаційними властивостями модифікованих поверхонь та удосконалення технології формування електроіскрових зносостійких покриттів;
- дослідити мікроструктуру і механічні властивості отриманих покриттів;
- встановити залежності інтенсивності зношування конструкційних сталей від розміру абразивних частинок та механізму руйнування;
- дослідити механізм підвищення зносостійкості покриттів із твердих сплавів (BK8, BK15, T15K6);
- проаналізувати закономірності градієнтного розподілу мікротвердості по глибині ЕПП-основа та його вплив на відшарування покриття;
- дослідити вплив карбідів на підвищення опору зношуванню ЕПП зі сталі P18, У10, кераміки ЦЛАБ-1; порошкового дроту Fe-Cr-B;
- визначити критичне співвідношення мікротвердості покриття до твердості абразиву для ефективного опору абразивному зношуванню;
- проаналізувати з застосуванням математичного апарату динамічні процеси при терті деталей з ЕПП в абразивному середовищі, що характеризуються виникненням автоколивань.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, УСТАНОВКА ДЛЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ АБРАЗИВНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ

2.1. Конструкційні матеріали основи та електродів для електроіскрового легування.

Конструкційні сталі є основою для високонавантажених вузлів для авіаційної та наземної техніки, проте вимоги до них різняться: в авіаційній галузі домінують вимоги щодо питомої міцності та ваги, а в наземній техніці – вимоги до зносостійкості [111].

Попри домінування алюмінію та полімерних композиційних матеріалів в конструктивних елементах авіаційної техніки, сталь використовується для важконавантажених елементів: сталь 30ХГСА використовують для силових стійок шасі, де потрібна екстремальна стійкість до ударних навантажень, жароміцні та нержавіючі сталі використовуються в деталях двигунів та соплах, що працюють в агресивних середовищах при високих температурах.

Для наземної техніки пріоритет віддається якісним вуглецевим сталям марок 08, 10, 20, 45, що використовуються для виготовлення рам, кузовів та деталей, що не потребують надвисокої міцності. З легованих конструкційних сталей 40Х та 18ХГТ виготовляють вали, шестерні та піввісі, оскільки вони мають високу втомну міцність.

Підвищення якості розглянутих марок сталей шляхом модифікування та нанесення покриттів дозволяє радикально змінити властивості поверхні, не змінюючи в'язку серцевину деталі. Метод ЕІЛ дозволяє створювати на сталевих деталях високоякісні, зносостійкі та корозійностійкі покриття, що значно підвищує експлуатаційні властивості сталей.

В якості матеріалів основи для нанесення електроіскрових покриттів використовували сталі 30, 45, 30ХГСА та 40Х.

Сталь 30 – це якісна конструкційна вуглецева сталь (табл. 2.1), яка широко застосовується в наземній техніці для виготовлення деталей невисокої міцності та середніх навантажень, таких як тяги, траверси, ричаги, вали, шпинделі, з'єднувальні муфти та ін.

Таблиця 2.1

Хімічний склад в % сталі 30

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.27-0.35	0.17-0.37	0.5-0.8	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08

Сталь 45 – це якісна конструкційна вуглецева сталь із середнім вмістом вуглецю близько 0,45% (табл. 2.2.), яка широко використовується в машинобудуванні для виготовлення деталей середньої та підвищеної міцності. Дана марка сталі є універсальним матеріалом, який у наземній техніці використовується для виготовлення високонавантажених деталей, таких як колінчасті вали, шестерні та осі, що потребують гартування для високої зносостійкості.

Нормалізацію сталі здійснювали за режимом: нагрівання до температури 950°C з наступним охолодженням в повітрі для отримання феритно-перлитної структури твердістю 95 HRB.

Таблиця 2.2

Хімічний склад в % сталі 45

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.42-0.5	0.17-0.37	0.5-0.8	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08

Сталь 30ХГСА – це високоміцна конструкційна легована сталь (табл. 2.3), яка широко застосовується в авіаційній та наземній техніці для виготовлення критично важливих деталей, що потребують поєднання високої міцності, пружності, в'язкості та зносостійкості. В авіаційній техніці вона використовується для виготовлення силових

елементів фюзеляжу, лонжеронів, стійок шасі, валів, фланців, кріплень та компресорних лопаток. В наземній техніці та машинобудуванні дана марка сталі застосовується для осей, шестерень, важелів, штоків, відповідальних зварних конструкцій та інших високонавантажених вузлів.

Таблиця 2.3

Хімічний склад в % сталі 30ХГСА

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28-0.34	0.9-1.2	0.8-1.1	до 0.3	до 0.025	до 0.025	0.8-1.1	до 0.3

Сталь 40Х – це якісна конструкційна легована хромом сталь (табл. 2.4), яка широко застосовується у машинобудуванні для виготовлення деталей підвищеної міцності. Вона характеризується високою твердістю та зносостійкістю. Використовується для виготовлення деталей, які зазнають інтенсивного зносу та ударних навантажень, таких як колінчасті вали, осі, шестерні, шпинделі, штоки гідроциліндрів, вали-шестерні та різні кріпильні елементи.

Таблиця 2.4

Хімічний склад в % сталі 40Х

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.36-0.44	0.17-0.37	0.5-0.8	до 0.3	до 0.035	до 0.035	0.8-1.1	до 0.3

Всі дослідні зразки виготовлялись з листового матеріалу в якості поставки в нормалізованому стані. Перед нанесенням електроіскрового покриття робоча поверхня зразка шліфувалась.

Матеріали електродів для електроіскрового легування представлені в табл. 2.5. Також використовувався електродний матеріал композиційної кераміки ЦЛАБ-1 з Ni-Cr

сполучником, виготовлений в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України (табл. 2.6). Пористість електроду ЦЛАБ-1 становила $\leq 3\%$.

Таблиця 2.5

Хімічний склад в % електродних матеріалів для ЕІЛ

Матеріал електроду	Хімічний склад
У10 (аналог за DIN – 1.1645)	1,1%C; 0,3%P; 0,2%S
P18 (аналог за DIN – 1.3355)	0,77%C; 4,2%Cr; 18,3%W; 1,2%V; 0,7%Mo
P6M5 (аналог за DIN – 1.3343)	(0,82 - 0,90)%C, (0,2 - 0,5)%Si, (0,2 - 0,5)%Mn, (3,8 - 4,4)%Cr, (5,5 - 6,5)%W, (4,8 - 5,3)% Mo, (1,7 - 2,1)% V
BK8 (аналог за DIN – HG30)	92%WC; 8%Co
BK15 (аналог за DIN – HG40)	85%WC; 15%Co
T15K6 (аналог за DIN – HS20)	79%WC; 15%TiC; 6%Co
FeB ₂ Cr	2%B, (1-5)% Cr

Таблиця 2.6

Фазовий склад та режим одержання електродного матеріалу ЦЛАБ-1 [112]

Склад (%)	Температура гарячого пресування, °C	Час спікання, хв
59,19LaB ₆ + 27,47ZrB ₂ + 15,33Ni + 5,25Cr + 0,42Al	1550—1600	25—35

2.2. Методика електроіскрового легування.

Процеси нанесення покриттів або обробка поверхні є найширше використовуваними методами покращення поверхневих властивостей сталей.

Електроіскрове легування зразків із конструкційних сталей розміром 30x30 мм здійснювали на установці «Елітрон-22» при постійному струмі короткого замикання 1А

[113] (рис. 2.1, табл. 2.7). Перед нанесенням покриття робоча поверхня зразка шліфувалась.



а)



б)

Рис. 2.1. Загальний вид установки для електроіскрового легування (а) та пристрій для фіксації зразків для ЕІЛ.

Основні технічні характеристики установки «Елітрон-22А»

Параметр	Значення
Напруга живлення	220 В ($\pm 10\%$), 50 Гц
Споживана потужність	до 400 В·А
Енергія імпульсу (розряду)	0,02 – 0,52 Дж
Кількість режимів роботи	5 – 6 ступенів потужності
Робочий струм (середній)	1,0 – 3,5 А
Напруга холостого ходу	25 – 45 В
Частота вібрації електрода	100 Гц
Амплітуда вібрації електрода	до 0,3 мм
Товщина шару (залежно від матеріалу)	0,01 – 0,08 мм
Продуктивність (легування)	0,5 – 2,0 см ² /хв
Маса приладу	~15 – 18 кг

У процесі електророзрядного розряду для сплавлення матеріалу електрода (анода) з металевою підкладкою (катодом) використовуються короткі електричні імпульси високого струму та низької напруги [114]. ЕІЛ також називають процесом мікррозварювання, оскільки він відбувається з низьким теплопідведенням та високою щільністю енергії. Під час процесу витратний електрод наближається до підкладки; це призводить до розряду накопиченої енергії з конденсаторів високої ємності між електродом та підкладкою. Завдяки електроіскровому розряду невелика частина

матеріалу електрода видаляється з електрода та переноситься на підкладку. Хоча електричний імпульс дуже короткий, він має достатню енергію, щоб розплавити або випарувати частину цього матеріалу електрода (еродованого матеріалу) та утворити плавильну ванну на підкладці. Перенесені матеріали осідають на підкладку, де осаджені матеріали сплавляються з матеріалом підкладки. Оскільки використовуються дуже короткі електричні імпульси, під час кожного імпульсу переноситься невелика кількість матеріалу, і осаджені матеріали швидко тверднуть у формі бризок на підкладці. Також тепло швидко розсіюється, що призводить до високих швидкостей охолодження в цьому процесі. Згодом це дозволяє отримати як надзвичайно дрібнозернисту (наноструктуру або аморфну мікроструктуру) структуру покриття високої щільності, так і тверді, міцні, дуже адгезійні та металургійно зв'язані поверхні. Таким чином, можна досягти унікальних трибологічних та корозійних характеристик у покриттях, нанесених методом ЕІЛ.

2.3. Методика випробування ЕІП на абразивне зношування.

Випробування покриттів проводили на експериментальній установці (рис. 2.2, 2.3) відповідно до ГОСТ 23.208-79 (Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробування матеріалів на зносостійкість при терті по нежорстко закріплені абразивні частинки). Даний стандарт втратив чинність, нового нормативного документу не розроблено. Однак, методика проведення досліджень, яка використана в роботі, аналогічна методиці в стандарті ASTM G65 Abrasive Wear Test [115, 113].

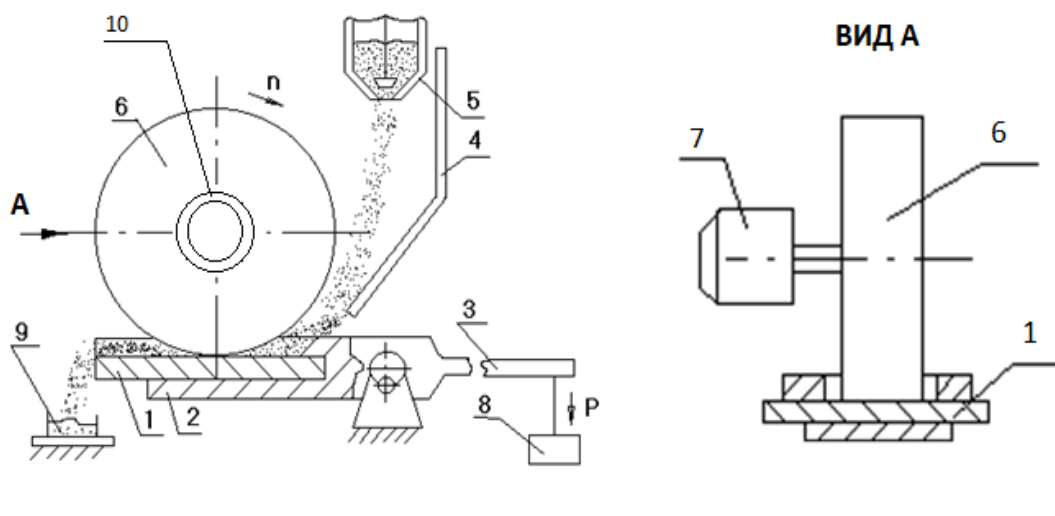
Процес абразивного зношування за обраним стандартом імітує умови, де домінує мікрорізання матеріалу, що дозволяє оцінити його стійкість до абразивного стирання в реальних умовах, коли частинки вільно рухаються між поверхнями.

В якості абразиву використовували кварцевий пісок (SiO_2) зернистістю 100...500 мкм. Перед випробуванням абразивні частинки просушували у електричній печі СШОЛ (вологість не перевищувала 0,16%). До і після випробування зразки із конструкційних сталей промивали в етиловому спирті і просушували. Експерименти проводили при

постійній швидкості обертання гумового ролика 0,158 м/с, навантажені 44,1 Н впродовж 10...60 хв.



Рис. 2.2. Загальний вид установки для випробування на абразивну стійкість.



а)

Рис. 2.3. Схема установки тертя для випробування на абразивну стійкість за ГОСТ 23.208-79 (а) та Abrasive Wear Test ASTM G65: 1 – зразок, 2 – утримувач, 3 – важіль, 4 – направляючий лоток для абразиву, 5 – дозуючий пристрій подачі абразивних часток, 6 – гумовий ролик, 7 – привід обертання, 8 – навантажувальний пристрій, 9 – бункер для відходів абразиву, 10 – вал.

Лінійний знос покриттів визначали на приладі ІКВ-6 (вертикальний оптиметр) (рис. 2.4). Діапазон проходу $\pm 100 \mu\text{м}$, похибка $\pm 1 \mu\text{м}$.



Рис. 2.4. Зовнішній вид приладу ІКВ-6.

Принцип роботи вертикального оптиметра ІКВ-6 ґрунтується на явищі автоколімації (принцип «дзеркального повернення») та використанні оптичного важеля.

Процес вимірювання відбувається у кілька етапів:

- перетворення механічного руху в оптичний (вимірювальний наконечник торкається деталі, зміщується вертикально, цей рух передається на рухоме дзеркало, закріплене всередині трубки на спеціальних опорах, внаслідок чого дзеркало нахиляється на певний кут);

- формування зображення (потрапляючи на нахилене дзеркало, промінь відбивається і повертається назад через об'єktiv. Оскільки дзеркало нахилене, відбите зображення шкали зміщується відносно нерухомого покажчика (індексу);

- обробка результату (реєстрація в окулярі на скільки поділок змістилася шкала відносно центральної мітки. Оскільки оптична система значно «посилює» механічний

рух, зміщення наконечника всього на 1 мікрон (0,001 мм) відповідає чіткому переміщенню шкали на одну поділку).

Вимірювання проводили вздовж доріжки тертя з кроком 3мм. Всього по доріжці виконували 6 вимірів, попередній досвід вимірювання показав, що параметри зносу і середнє квадратичне відхилення (СКВ) при збільшені кількості вимірювань суттєво не змінюються.

Середнє значення величини лінійного зносу покриття обчислювали за формулою:

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2.1)$$

а СКВ (ς) – за формулою:

$$\varsigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n}} \quad (2.2)$$

Величина ς характеризувала розкид результатів вимірювань відносно $\bar{x}$.

Ваговий знос покриттів визначали на вагах Axis ANG200C 2-го класу точності з дискретністю 0,0001 г (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Ваги Axis ANG200C для вимірювання вагового зносу зразків.

2.4. Металографічний та рентгеноструктурний аналіз матеріалів.

Структурний стан зразків досліджували за допомогою рентгенівського структурно-фазового аналізу на дифрактометрі ДРОН-3М у випромінненні CuK_α .

Дифрактометр ДРОН-3М є багатоцільовим приладом, призначеним для широкого кола рентгеноструктурних досліджень (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

Основні технічні характеристики

Найменування параметру	Параметр приладу
Потужність рентгенівської трубки	1 кВт
Діапазон частот	10-400 МГц
Трубка	CuK_α (Ni фільтр)
Струм трубки	5-40 мА
Прискорююча напруга	20-40 кВ
Діапазон кутів 2Θ	-5 ° до 145 °
Мінімальний крок зйомки	$2\Theta = 0.01$
Час витримки в точці	3-20 сек

Використання CuK_α -випромінювання в дифрактометрі ДРОН-3М є стандартною практикою для проведення різноманітних рентгеноструктурних досліджень. Довжина хвилі CuK_α -випромінювання становить приблизно 1,5418 Å. Це значення є ключовим параметром для розрахунку кутів дифракції та визначення параметрів кристалічної ґратки речовин згідно із законом Брегга. Для забезпечення монохроматичності випромінювання та усунення небажаного K_β -випромінювання, як правило, використовують монокристал графіту або спеціальні фільтри, встановлені на шляху променя. Це дозволяє отримати чіткіші та інформативніші дифрактограми. Комбінація ДРОН-3М та CuK_α -випромінювання використовується для якісного та кількісного фазового аналізу, визначення макро- та мікронапружень, а також для вивчення

структурних характеристик полікристалічних матеріалів (металів, сплавів, неорганічних та органічних сполук).

Принцип роботи полягає у вимірюванні інтенсивності дифрагованого рентгенівського пучка в залежності від кута дифракції (2θ) шляхом переміщення лічильника навколо зразка. Результатом вимірювання є дифрактограма — графік залежності інтенсивності від кута дифракції.

Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі ММР-2Р (табл. 2.9). Мікроскоп ММР-2Р є настільним металографічним приладом із вертикальним розташуванням предметного столика. Він дозволяє проводити візуальні спостереження об'єктів через біокулярну насадку, а також виводити зображення на демонстраційний екран чи фотографувати на плівку або пластинку.

Таблиця 2.9

Технічні характеристики мікроскопу ММР-2Р

Параметр	Значення
Збільшення мікроскопа, крат	от 100 до 1100
Предметний столик:	
Межі переміщення у двох взаємно перпендикулярних напрямках, мм	30 x 20
Ціна поділки шкали, мм	1,0
Ціна поділки ноніуса, мм	0,1
Джерело світла (живлення лампи здійснюється від мережі змінного струму напругою 220, частотою 50Гц через блок живлення)	лампа розжарювання ОП12-100
Потужність, Вт	95

Мікроскоп ММР-2Р має один предметний столик, керований від руки. Мікроскоп має досить складний пристрій, який включає механічну систему, оптику (об'єктиви та окуляри), освітлювальну систему та систему фотографування.

Збільшення зображення об'єкта в мікроскопі: перше збільшення дає об'єктив, друге – окуляр. Об'єктив та окуляр представляють складні оптичні системи та складаються з кількох лінз. Для вибору оптимальної комбінації окуляра та об'єктива на мікроскопі ММР-2Р важливо враховувати, що загальне збільшення приладу обчислюється як добуток збільшення об'єктива на збільшення окуляра. Стандартний діапазон збільшень для ММР-2Р становить від 100х до 1100х. Для загального огляду досліджуваного об'єкта доцільно застосовувати слабкі збільшення об'єктиви, для більш ретельного дослідження стану ЕІП до та після тертя – сильні. Об'єктиви та окуляри підбираються за таблицею збільшення (табл. 2.10).

Таблиця 2.10

Діапазон збільшення мікроскопу ММР-2Р

Об'єктив	Окуляр		
	12,5 ^x	15 ^x	20 ^x
F = 23,2; A = 0,17	100	130	170
F = 8,2; A = 0,37	300	370	490
F = 6,2; A = 0,65	400	490	650
F = 4,3; A = 0,95	680	700	930

Також металографічні дослідження проводили на інвертованому мікроскопі ІЕ200М, який використовується для дослідження мікроструктури металів, сплавів та інших непрозорих зразків у відбитому світлі (рис. 2.6). Мікроскоп оснащений кінцевою оптичною системою (160 мм) та тринокулярною візуальною насадкою типу Gemel з кутом нахилу 45°, що забезпечує комфортне спостереження та можливість підключення цифрової камери для аналізу зображень. Стандартна комплектація включає широкопільні окуляри PL10X/18 мм та набір довгофокусних планхроматичних об'єктивів зі збільшенням 5X, 10X, 20X та 50X, що дозволяє досягати загального збільшення до 500 крат (або до 2000 крат при використанні додаткових аксесуарів). Прилад обладнаний великим тришаровим механічним предметним столом розміром

180x155 мм з діапазоном переміщення 75x40 мм, а також коаксіальним механізмом грубого та точного фокусування з кроком 2 мкм. Система освітлення побудована за принципом Келера з використанням світлодіода потужністю 5 Вт (LED), що забезпечує рівномірне підсвічування непрозорих зразків, та включає ірисову польову діафрагму і комплект для простої поляризації. Завдяки міцній антивібраційній конструкції та високій роздільній здатності оптики, модель широко використовується в металургії, електроніці, геології та наукових лабораторіях для аналізу мікроструктур, контролю якості напівпровідникових пластин та дослідження морфології поверхні металів.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд мікроскопу для металографічних досліджень IE200M.

2.5. Методи вимірювання твердості матеріалу основи та ЕП.

Оцінювання твердості є ключовим способом неруйнівного контролю, що дозволяє проаналізувати міцнісні параметри металу. Цей показник визначає експлуатаційний ресурс і надійність деталей у різноманітних технічних вузлах, демонструючи здатність матеріалу протистояти інтенсивному механічному зносу та зовнішньому тиску.

Попри єдину фізичну природу більшості лабораторних випробувань, конкретні методики обирають відповідно до властивостей зразка та мети дослідження. Основна відмінність між ними полягає в конфігурації використовуваних інденторів (наконечників). Методологія базується на деформації поверхні шляхом створення

відбитку. Найбільш затребуваними в інженерній практиці є підходи, що передбачають вдавлювання інденторів у формі сфери, конуса або піраміди — це відомі методи Брінелля, Роквелла, а також мікротвердометричні випробування за Віккерсом і Кнупом.

В дисертаційній роботі для визначення твердості матеріалу основи перед початком електроіскрового легування використано метод Роквелла. Це дозволяє переконатися, що заготовка пройшла необхідну термічну обробку та готова до нанесення зміцнюючого шару.

Принцип вимірювання твердості полягає в визначенні даного параметру за глибиною проникнення індентора в метал. На відміну від методів Брінелля чи Віккерса, результат зчитується безпосередньо за шкалою індикатора приладу, що робить процес швидким і зручним (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Зовнішній вид приладу Роквелла та шкали індикатора.

Вибір шкали ґрунтується на наступних принципах:

- шкала С (HRC) – найбільш вживана для сталевих основ, що пройшли загартування (використовується алмазний конус (кут 120°) з навантаженням 150 кгс);

- шкала А (HRA) – застосовується для дуже твердих матеріалів або тонких листових сталей (використовується алмазний конус (кут 120°) з навантаженням 60 кгс);
- шкала В (HRB)- застосовується для м'яких, відпалених сталей або кольорових сплавів (використовується сталева кулька (діаметр 1/16 дюйма або 1,588 мм) і навантаження 100 кг).

Важливим етапом вимірювання твердості за Роквеллом є підготовка поверхні основи матеріалу. Поверхня має бути очищена від окалини, мастила та іржі. Будь-які забруднення можуть спотворити результат. Перед вимірюванням твердості ділянку зазвичай шліфують. Хоча метод Роквелла менш чутливий до шорсткості, ніж Віккерс, для високої точності рекомендується дзеркальна або напівдзеркальна поверхня. Поверхня повинна бути строго перпендикулярна до осі індентора, щоб уникнути перекосів і неточних показників.

Електроіскрове покриття утримується на основі завдяки металургійному зв'язку, який формується при локальному мікроплавленні. Якщо твердість основи не відповідає розрахунковій (наприклад, сталь занадто м'яка), покриття може «просідати» або відшаровуватися під час подальшої експлуатації через недостатню жорсткість підкладки.

Товщина шару, отриманого ЕІЛ, є критичним фактором, що визначає вибір методу контролю. Електроіскрові покриття зазвичай мають товщину від декількох до 100 мкм, що накладає суворі обмеження на глибину проникнення індентора.

Обмеження для застосування твердомірів, зумовлені товщиною ЕП:

- ризик «продавлювання» - якщо індентор проникає занадто глибоко, прилад покаже не справжню твердість покриття, а змішане значення, на яке сильно впливає м'якша основа;
- правило 1/10 - для отримання коректних результатів глибина відбитку не повинна перевищувати 1/10 (10%) від загальної товщини нанесеного шару. Наприклад, для покриття товщиною 50 мкм глибина проникнення алмазної піраміди має бути не більше 5 мкм;

- нерівномірність шару - ЕІЛ-покриття часто мають значну шорсткість та пористість. Це робить неможливим використання стандартних методів Роквелла чи Брінелля, оскільки великі навантаження зруйнують тонкий та крихкий шар.

Враховуючи зазначені особливості щодо визначення твердості ЕІП, встановлено, що для тонких електроіскрових шарів безальтернативним є метод Віккерса з мінімальними навантаженнями (вимірювання мікротвердості ЕІП).

За даним методом мікротвердість ЕІП можна виміряти за допомогою приладу ПМТ-3 (мікротвердомір) (табл. 2.11). Вимоги до методу та перевірки обладнання викладені в ДСТУ ISO 6507-1:2007.

Таблиця 2.11

Основні характеристики приладу ПМТ-3

Характеристика	Значення
Метод вимірювання	Віккерса (алмазна піраміда)
Діапазон навантажень	0,0196 – 4,9 Н (0,002 – 0,5 кгс)
Управління навантаженнями	Ручне
Збільшення мікроскопа	130х, 500х, 800х (залежно від окуляра/об'єктива)
Вимірювання відбитку	За допомогою окулярного мікрометра (наприклад, МОВ-1-16х) або цифрової камери

Метод вимірювання на ПМТ-3 ґрунтується на вдавлюванні алмазної чотиригранної піраміди з квадратним основою та кутом при вершині 136°. Це ідеально підходить для тонких і крихких шарів, характерних для ЕІЛ.

Прилад дозволяє застосовувати малі навантаження в діапазоні від 0,0196 Н до 4,9 Н (від 2 г до 500 г). Це критично важливо для вимірювання мікротвердості саме тонкого поверхневого шару покриття, а не основного (базового) матеріалу під ним.

Для отримання точних результатів вимірювання проводять на полірований поверхні шліфа (поперечному зрізі зразка), щоб уникнути впливу шорсткості поверхні покриття.

Вимірювання мікротвердості на різних глибинах (побудова кривих розподілу мікротвердості по глибині) також дозволяє оцінити ефективну товщину легованого шару та зону термічного впливу (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Зображення ЕП-основа на приладі ПМТ-3.

Дослідження мікротвердості проводили, дотримуючись наступної послідовності операцій:

- підготовчий етап та індентування: попередній візуальний аналіз поверхні зразка під мікроскопом дозволяв обрати репрезентативну ділянку для випробувань. Після позиціювання обраної зони безпосередньо під алмазний наконечник здійснювали навантаження індентора 20...50 г з подальшою витримкою та зняттям зусилля;

- оптичні вимірювання: для мінімізації похибок, зумовлених абераціями оптичної системи на краях лінзи, вимірювання діагоналей відбитка виконували в центрі поля зору. Використовуючи окулярний мікромметр, фіксували координати вершин відбитка. Щоб виключити вплив люфту гвинтового механізму, підведення перехрестя ліній до кутів відбитка здійснювали в одному напрямку (наприклад, справа наліво);

- обробка результатів: довжину діагоналі d (у мікронах) визначали як різницю показників за шкалою барабана, помножену на ціну поділки мікромметра. Оскільки метод є досить трудомістким і чутливим до суб'єктивних похибок (точність приладу становить приблизно $\pm 0,15$ мкм), для розрахунків використовували середнє значення двох діагоналей;

- розрахункова частина: обчислення показника мікротвердості (H) проводили за класичною формулою, що базується на відношенні прикладеного зусилля до площі бічної поверхні отриманого відбитка:

$$H = \frac{1854 \times m \times 9,8}{d_{\text{сер}}^2}, \quad (2.3)$$

де m – маса навантаження (г); $d_{\text{сер}}$ – середня довжина діагоналі (мм), розрахована з урахуванням масштабного коефіцієнта приладу (0,00031).

Такий підхід дозволяє нівелювати інструментальні похибки та отримати достовірні дані про фізико-механічні властивості сформованого шару.

Висновки до розділу 2.

1. Для досліджень були обрані конструкційні сталі марок 30, 45, 30ХГСА та 40Х як матеріали основи для нанесення ЕПІ, які застосовуються у відповідальних вузлах авіаційної та наземної техніки, що потребують поєднання міцності, в'язкості та зносостійкості. Модифікація та нанесення покриттів на сталі дає змогу створити на сталевих виробах високоякісний, стійкий до зношування поверхневий шар, що значно подовжує термін їхньої експлуатації. Покращення якості сталі через поверхневе

зміцнення методом ЕІЛ забезпечує високу твердість зовнішнього шару без втрати в'язкості основного матеріалу.

2. Використані електродні матеріали (У10, Р18, Р6М5, ВК8, ВК15, Т15К6, FeB2Cr та композиційна кераміка ЦЛАБ-1) дозволяють формувати покриття з різним хімічним складом та властивостями, зокрема високою твердістю та зносостійкістю. Обраний широкий спектр матеріалів електродів для досліджень електроіскрових покриттів на абразивну стійкість у поєднанні з гнучким налаштуванням режимів обробки дозволяє вибрати оптимальне покриття з найбільшою зносостійкістю та формувати поверхневі шари з прогнозованою абразивною стійкістю.

3. Електроіскрове легування сталевих поверхонь зносостійкими покриттями забезпечує комплексне покращення експлуатаційних характеристик деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного впливу. Ключовою перевагою методу є формування надійного металургійного зв'язку між покриттям та основою, що виключає відшарування захисного шару під дією значних механічних навантажень. Процес відбувається за низького середнього теплового вкладу в оброблювану деталь, завдяки чому основний метал не зазнає термічних деформацій та зберігає свою вихідну мікроструктуру. Процес нанесення покриттів здійснювався на установці «Елітрон-22А» з використанням постійного струму короткого замикання 1А. Окрім підвищення твердості, метод ЕІЛ сприяє утворенню градієнтної структури, де дифузійний підшар забезпечує плавну передачу напружень від твердого покриття до пластичної основи, що підвищує загальну тріщиностійкість. Важливою перевагою є також екологічність та енергоефективність методу.

4. Випробування ЕІП на абразивне зношування проводили відповідно до стандартів ГОСТ 23.208-79 (аналог – ASTM G65), використовуючи експериментальну установку з нежорстко закріпленими абразивними частинками. Схема з нежорстко закріпленим абразивом (кварцовим піском) максимально наближена до реальних умов експлуатації деталей авіаційної та наземної техніки, де відбувається постійне оновлення абразивного середовища. Це дозволяє отримати об'єктивні дані про динаміку

зношування, а не лише статичну твердість покриття. Методика забезпечує високу відтворюваність результатів завдяки чіткій регламентації зусилля притискання, швидкості обертання гумового ролика та витрати піску, що критично важливо для порівняльного аналізу різних складів електродів. Використання частинок фракції 100-500 мкм дозволяє ефективно оцінити не лише опір мікрорізанню, а й здатність покриття витримувати мікроударні навантаження без крихкого викришування карбідної фази. Можливість розрахунку відносної зносостійкості (у порівнянні з еталоном) дає змогу чітко кількісно визначити ефективність легування, що є вагомим аргументом при виборі оптимальної технології зміцнення.

5. Використане в роботі комплексне поєднання методів структурного аналізу є важливим для розуміння природи абразивної стійкості ЕІП, оскільки саме фазовий склад та топографія поверхні визначають ресурс ЕІП. Оптична металографія (ММР-2Р, ІЕ200М) дозволяє візуалізувати морфологію сформованого шару, оцінити його суцільність, товщину та наявність мікропор чи тріщин. Аналіз на інвертованому мікроскопі забезпечує точне визначення глибини дифузійної зони, що безпосередньо впливає на адгезійну міцність покриття при контакті з твердими абразивними частинками. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (ДРОН-3М) має вирішальне значення для ідентифікації новоутворених фаз, що виникають внаслідок плазмохімічних реакцій у міжскровому проміжку. Такий системний підхід дає змогу встановити прямий зв'язок між параметрами процесу легування, мікроструктурою та кінцевою зносостійкістю, що необхідно для наукового обґрунтування вибору електродних матеріалів.

6. Обґрунтовано вибір методів вимірювання твердості основа-покриття. Контроль основи за Роквеллом забезпечує верифікацію вихідного стану сталі, що необхідно для оцінки градієнта твердості між захисним покриттям та матрицею. Це дозволяє спрогнозувати здатність основи протистояти пластичній деформації під навантаженням. Для вимірювання мікротвердості тонких ЕІП (товщина до 100 мкм) було встановлено, що безальтернативним є метод Віккерса з мінімальними навантаженнями. Використання приладу ПМТ-3 дозволило застосовувати навантаження в діапазоні 20....100 г та

вимірювати діагоналі відбитка на полірованому поперечному зрізі зразка, дотримуючись «правила 1/10» для уникнення впливу м'якшої основи. Робота з приладом ПМТ-3 на поперечних шліфах дозволяє будувати криві розподілу мікротвердості по глибині. Це дає змогу виявити зміцнений дифузійний підшар, який відповідає за плавний перехід властивостей і запобігає відшаруванню покриття під час абразивного впливу. Такий підхід дозволяє детально вивчити механічні властивості покриття, що є ключовим для розробки зносостійких шарів з високим опором до мікрорізання за умов впливу абразивних часток.

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМИ ПОКРИТТЯМИ

3.1. Оцінка відносної зносостійкості ЕІП на сталі 45.

Відносна зносостійкість – це безрозмірний показник, що визначає здатність матеріалу чинити опір зношуванню порівняно з еталоном. Вона розраховується як відношення зносу еталонного матеріалу до зносу досліджуваного зразка за однакових умов (навантаження, швидкість, середовище).

Мета роботи полягала в підвищенні зносостійкості конструкційної середньолегованої сталі 45 в абразивному середовищі шляхом зміцнення поверхневого шару методом електроіскрового легування. В якості абразиву використовували кварцевий пісок (SiO_2) зернистістю 250-500 мкм.

Нормалізацію сталі 45 здійснювали за режимом: нагрівання до температури 950°C з наступним охолодженням в повітрі для отримання феритно-перлитної структури твердістю 95 HRB. Електроди виготовляли із високовуглецевої сталі У12, швидкоріжучої сталі Р18, твердих сплавів ВК8 і Т15К6.

В результаті експерименту встановлено, що в процесі взаємодії твердих абразивних частинок з матеріалом покриття на його робочі поверхні формується видима зона контакту, яка має вигляд лунки (рис. 3.1, а).



а)

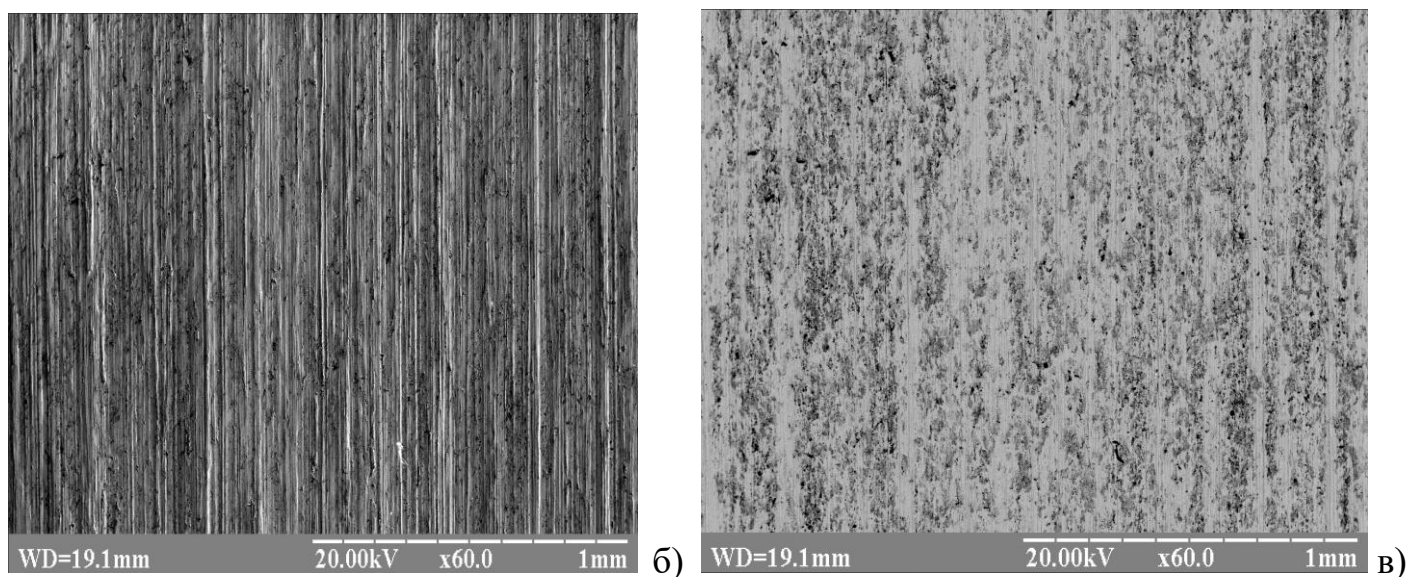


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд зони тертя (а) і топографія зони контакту після абразивного зношування Ст 45 без покриття (б) і з електроіскровим покриттям сталі P18 (в).

Глибина лунки характеризує величину зносу досліджуваних покриттів. Як видно з таблиці 3.1, покриття, отримані електроіскровим легуванням, значною мірою підвищують зносостійкість конструкційної сталі 45, яка широко використовується у вузлах тертя машин та механізмів, зокрема, у технічних засобах наземної авіаційної техніки (тягачі, компресори, паливозаправники та ін.).

Таблиця 3.1

Відносна зносостійкість електродних матеріалів

Матеріал електроду	Твердість	Відносна зносостійкість
Ст 45	95 HRB	1
У10	62 HRA	1,96
P18	69 HRA	2,3
BK8	87 HRA	2,9
T15K6	90 HRA	3

Відомо [117], що на інтенсивність абразивного зношування суттєвий вплив здійснюють багато факторів, а саме: властивості матеріалів, вид їх взаємодії, геометрія

твердих частинок, агресивність середовища та ін. Особливу роль відіграє твердість контактуючих матеріалів (твердих абразивних частинок і зношуваного матеріалу), що підтверджено представленими в табл. 3.1 результатами досліджень.

Найбільше руйнування, а відповідно і зношування, виявлено у ЕІП сталі У10. При взаємодії твердих абразивних частинок з робочою поверхнею сталевго зразка у місцях контакту відбувається занурення їх у поверхневий шар матеріалу з подальшим руйнуванням у процесі його мікрорізання одиничними зернами кварцевого піску, про що свідчать сліди на поверхні сталі, які мають форму борозни. Незначна поверхнева міцність сталі У10 та невелика її твердість спричинюють домінування процесів пластичного деформування внаслідок низького опору, що призводить до інтенсифікації абразивного зношування, в порівнянні з іншими досліджуваними зразками.

Аналіз отриманих результатів показав, що модифікація сталі 45 електроіскровими покриттями, отриманими при використанні у якості електродного матеріалу Р18, ВК8 і Т15К6, суттєво знижують знос сталі. На поверхні тертя кількість і глибина борозн зменшується (рис. 3.1,в), інтенсивність зношування уповільнюється.

Механізм підвищення зносостійкості при модифікації сталі 45 електроіскровими покриттями сплавів ВК8 та Т15К6 базується на створенні гетерогенної структури, що поєднує високу твердість армуючих фаз із в'язкістю матриці. Теоретично цей процес описується як створення бар'єрів для пластичної деформації: тверді включення карбідів вольфраму (WC) та титану (TiC) виступають у ролі стопорів для руху дислокацій, що значно підвищує опір матеріалу мікрорізанню та абразивному впливу. Завдяки наявності пластичної кобальтової зв'язки, енергія механічного впливу частково дисипується, запобігаючи крихкому сколюванню твердих частинок. Це зумовлює перехід від інтенсивного адгезійного або абразивного зношування до режиму стабільного тертя, що візуально підтверджується згладжуванням мікрорельєфу поверхні та зменшенням глибини борозен. Електроіскрове легування також сприяє утворенню вторинних структур та зон термічного впливу з підвищеною щільністю дефектів кристалічної

ґратки, що додатково зміцнює поверхневий шар за рахунок ефекту дисперсійного твердіння.

3.2. Залежність зносостійкості електроіскрових покриттів на основі композиційних матеріалів та сталей від зміцнюючих фаз.

Дослідження залежності зносостійкості електроіскрових покриттів від типу зміцнюючих фаз є критично важливим через стрімке зростання вимог до надійності вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах. Актуальність полягає у можливості керувати масопереносом та структурними перетвореннями в зоні короткочасного термічного впливу для подовження ресурсу деталей машин без використання вартісних методів об'ємного легування. Дослідження фізико-хімічних процесів при ЕІЛ є ключовим для розуміння природи адгезії та фазового складу покриття.

Детальний аналіз зміцнюючих фаз дозволяє досягти максимальної зносостійкості при мінімальній товщині шару, що економить дорогі компоненти (кобальт, вольфрам). Розуміння того, як конкретні фази (WC, TiC, (W,Ti)C) впливають на зносостійкість модифікованої поверхні в умовах абразивного зношування, дозволяє створювати «інтелектуальні» покриття під конкретні пари спряження. Вивчення того, як дисперсність та розподіл карбідів у матриці при формуванні ЕІП впливають на швидкість зношування, є основою для формування структури, де зміцнюючі фази забезпечують твердість, а матриця запобігає відшаруванню покриття під дією динамічних навантажень.

Зразки розміром 30x30 мм були виготовлені із конструкційної легованої сталі 30ХГСА (аналог 30HGSA (Польща)) та конструкційної вуглецевої якісної сталі 45. Всі дослідні зразки виготовлялись з листового матеріалу в якості поставки в нормалізованому стані. Електроіскрове легування зразків здійснювали на установці «Елітрон-22» при постійному струмі короткого замикання 1А.

Електроди виготовляли із високовуглецевої сталі У10, швидкоріжучої сталі Р18, твердого сплаву ВК8 і кераміки ЦЛАБ-1.

Випробування покриттів проводили відповідно до ГОСТ 23.208-79.

Найбільшу зносостійкість в умовах впливу абразиву на повітрі без змащувального матеріалу серед усіх досліджених ЕП на конструкційних сталях 30ХГСА та 45 проявляє ЕП вольфрамокобальтовий сплав ВК8. Ваговий знос досліджуваних ЕП, сформованих на сталі 30ХГСА, в 1,8 рази менше для ЕП з кераміки ЦЛАБ-1 та твердого сплаву ВК8, в 1,6 рази менше для ЕП з високовуглецевої сталі У10 та в 1,1 рази менше для ЕП з швидкоріжучої сталі Р18 (рис. 3.2). Інтенсивність зношування зазначених покриттів на 180 м напрацювання характеризується аналогічними кількісними показниками (табл. 3.2).

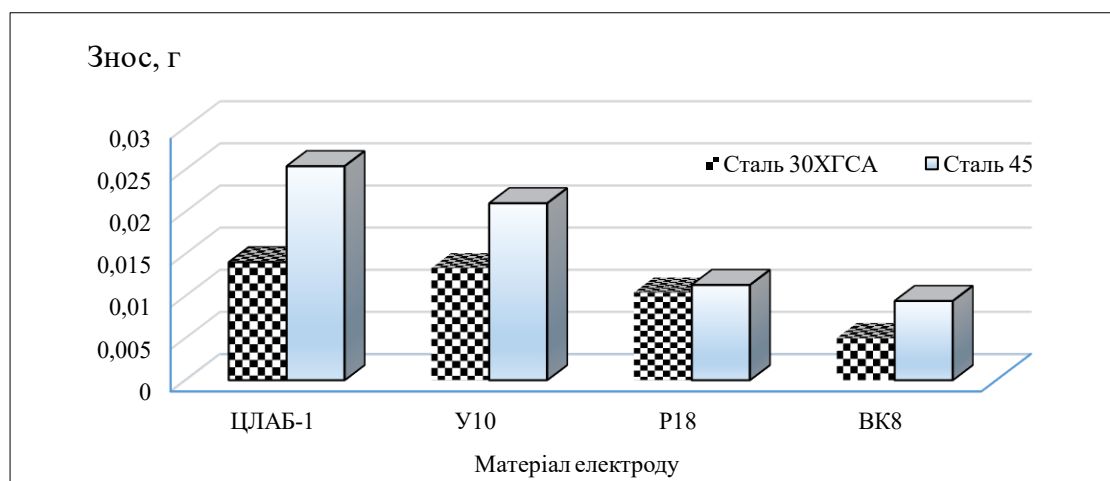


Рис. 3.2. Ваговий знос електроіскрових покриттів в абразивному середовищі.

Таблиця 3.2

Інтенсивність зношування електроіскрових покриттів на конструкційних сталях

Матеріал основи	Матеріал електроду			
	ЦЛАБ-1	У10	Р18	ВК8
Сталь 30ХГСА	7,38E-05	7,01E-05	5,49E-05	2,64E-05
Сталь 45	1,34E-04	1,11E-04	5,96E-05	4,96E-05

Зміцнююча фаза в ЕП значно впливає на опір зношуванню в абразивному середовищі. Згідно [118], підвищення зносостійкості сплавів обумовлено наявністю

найбільш твердих структурних компонентів – карбідів або боридів. При цьому, зносостійкість карбідовмісних сплавів залежить від твердості карбідів, співвідношення карбідної фази та матриці.

Найменша зносостійкість керамічного покриття ЦЛАБ-1 обумовлена наявністю в матричній фазі LaB₆ покриття боридної складової ZrB₂ підвищеної мікротвердості (24...27 ГПа), що призводить до крихкості сформованого ЕП. В роботі [119] зазначено, що провідними механізмами зношування ЕП, які містять диборид цирконію підвищеної твердості, є крихке руйнування і окислювальний механізм.

Зносостійкість ЕП високовуглецевої сталі У10, яка має структуру вторинного цементиту та перліту, обумовлена наявністю карбиду заліза, вагова частка якого становить до 16%. Однак, карбіди заліза відносяться до найменш стійких карбідів, у порівнянні з карбідами легуючих елементів, оскільки їм притаманна крихкість. Саме домінування крихкого руйнування даного покриття при абразивному зношуванні свідчить про аналогічний механізм, встановлений ЦЛАБ-1. Інтенсивність зношування цих покриттів не має суттєвих відмінностей. Для підвищення зносостійкості ЕП з сталі У10 необхідно використовувати електрод з термічною обробкою: згідно [120] загартування сталі У10 з аустенітної області призводить до розчинення вторинних карбідів та появи значної кількості залишкового аустеніту (структура мартенситу відпуску з $A_{\text{зал}}$), що призводить до зростання зносостійкості такої сталі в абразивному середовищі на 10,4 %/

Підвищення зносостійкості сталей з ЕП зі сталі Р18 встановлено на 24% для сталі 30ХГСА та на 50% для сталі 45, в порівнянні з попередньо розглянутими покриттями. Опору зношуванню в абразивному середовищі ЕП зі сталі Р18 сприяє наявність великої кількості карбідів, загальна кількість яких складає, в середньому, 28%. Основним карбідом сталі Р18 є складний карбід вольфрама $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ (Me_6C), в якому може розчинятися частина ванадію та хрому [121]. Карбідоутворюючі елементи V та Mo також підвищують експлуатаційні характеристики ЕП із сталі Р18.

Сплави та покриття WC-Co широко використовуються в промисловості, так як характеризуються поєднанням високої твердості та зносостійкості, тому сплав BK8 використовували для зміцнення досліджуваних сталей методом ЕІЛ. Вольфрамокобальтовий сплав BK8 містить 92% карбіду вольфраму WC. Однак, рентгенівський структурно-фазовий аналіз дифрактограм ЕІП з сплаву BK8 після тертя показав наявність в покритті фаз напівкарбіду вольфраму W_2C і β -карбіду вольфрама WC_{1-x} (рис. 3.3).

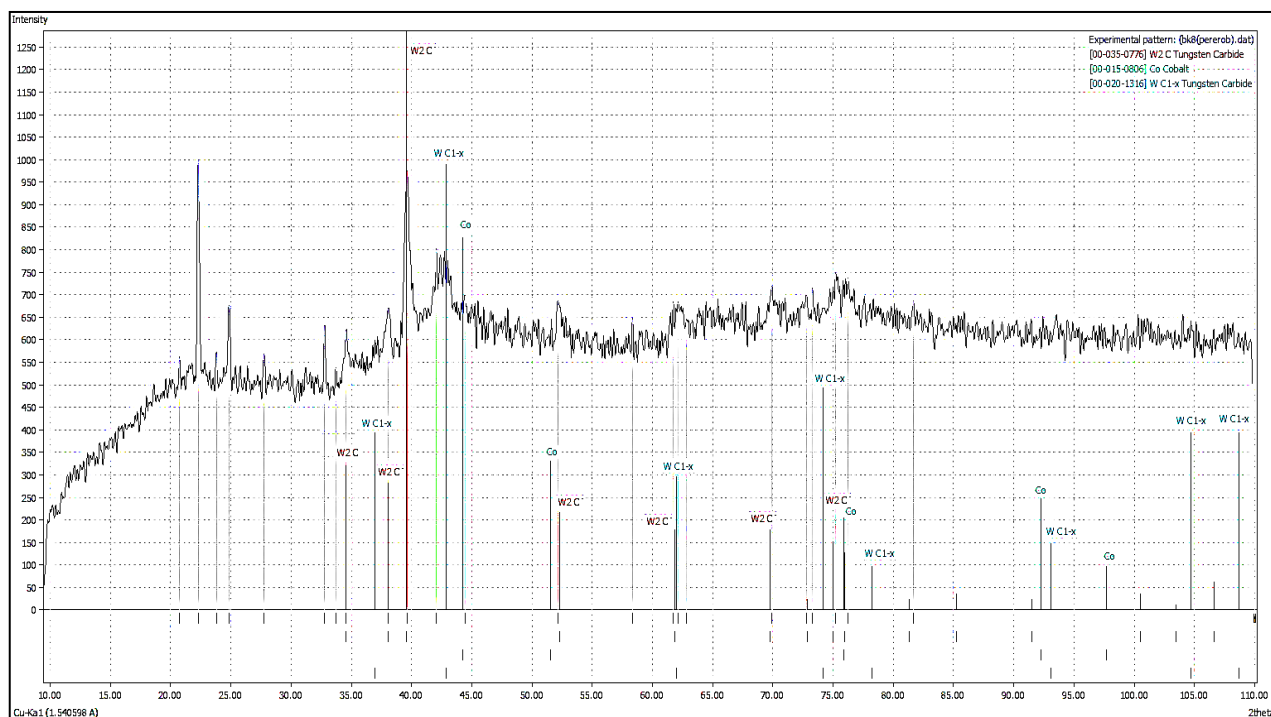


Рис. 3.3. Рентгенівська дифрактограма електроіскрового покриття сплаву BK8 після тертя в абразивному середовищі.

В спектрі не виявлено фази WC, що свідчить про його деструкцію. Фазова та структурна неоднорідність сформованого ЕІЛ-покриття зі сплаву BK8 може бути обумовлена миттєвим неоднорідним розподілом температурних полів на робочій поверхні анод-катод, внаслідок чого фізико-хімічні процеси на локальних ділянках протікають за різних температур. При терті активуються окислювальні процеси в поверхневих шарах матеріалу, при цьому, згідно [122] кисень є додатковим фактором, що призводить до втрати вуглецю карбідом. В порівнянні з WC, W_2C характеризується

більшою термостійкістю, твердістю (до 23,7 ГПа) та проявляє вищі протизношувальні властивості.

Таким чином, дослідження характеру зносостійкості ЕІП в абразивному середовищі залежно від типу карбідної фази можуть бути базою для обґрунтованого вибору електроіскрового легування сталей для підвищення їх зносостійкості. Отримані результати вказують на перспективність ЕІП із сталі Р18 та сплаву ВК8 з необхідним рівнем властивостей для підвищення зносостійкості конструкційних сталей 30ХГСА та 45.

3.3. Вплив карбідів ЕІП на зносостійкість конструкційних сталей 30, 45 та 30ХГСА.

Конструкційні сталі 30, 45 та 30ХГСА є основними матеріалами для навантажених деталей (вали, шестерні), проте вони часто піддаються абразивному зношуванню та схопленню у вузлах тертя. Використання ЕІЛ дозволяє локально зміцнювати поверхню без значного термічного впливу на основу.

Мета дослідження полягала в оцінці зміни фазового складу (зокрема поява вторинних карбідів) та мікроструктури при використанні інструментальних сталей в якості електродів для ЕІП на абразивну зносостійкість сталей 30, 45 та 30ХГСА.

Для досліджень обрано конструкційну леговану сталь 30ХГСА та конструкційні вуглецеві якісні сталі 30 та 45 в якості поставки в нормалізованому стані. Нанесення ЕІП здійснювали на установці «Елітрон-22» при постійному струмі короткого замикання 1А. В якості електродів використовували високовуглецеву сталь У10 та швидкоріжучу сталь Р18. Використання високовуглецевої сталі У10 та швидкорізальної сталі Р18 як електродів для електроіскрового легування (ЕІЛ) забезпечує комплексне зміцнення поверхні сталевих деталей, поєднуючи економічну ефективність із високими експлуатаційними характеристиками.

В вихідному стані всі досліджувані сталі мають ферито-перлітну структуру, сформовані ЕІП характеризуються дискретною структурою (рис. 3.4).

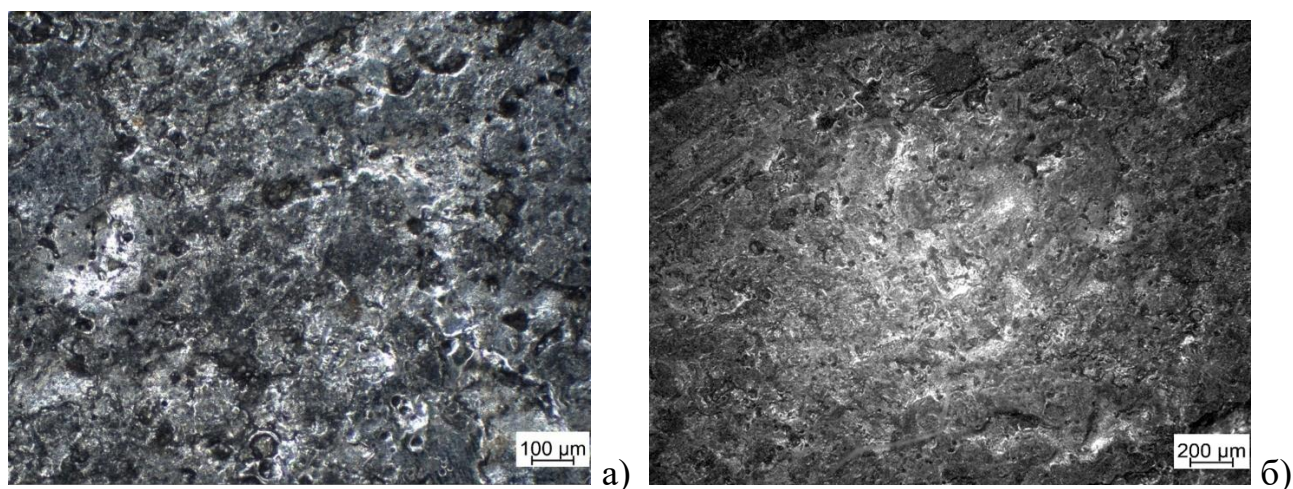


Рис. 3.4. Зовнішнє зображення електроіскрових покриттів, сформованих з електродів сталі У10 (а) та сталі Р18 (б) на конструкційній сталі 45.

Дослідження на абразивне зношування проводили за методикою, аналогічною ASTM G65 Abrasive Wear Test (абразив – кварцевий пісок (SiO_2) зернистістю 500 мкм; швидкість обертання гумового ролика 0,158 м/с; навантаження 44,1 Н; тривалість випробування – 20 хв).

Аналіз мікроструктури ЕІП встановив, що після тертя покриття характеризуються острівковим розташуванням (дискретною структурою) з різною товщиною локальних шарів (від ~ 40 мкм до 3-6 мкм) (рис. 3.5). Покриттям сталей У10 та Р18 притаманна висока адгезійна та когезійна міцність, що візуально оцінювалась за однорідністю структури покриття, відсутності тріщин та сколів як в покритті, так і на межі основа-покриття.

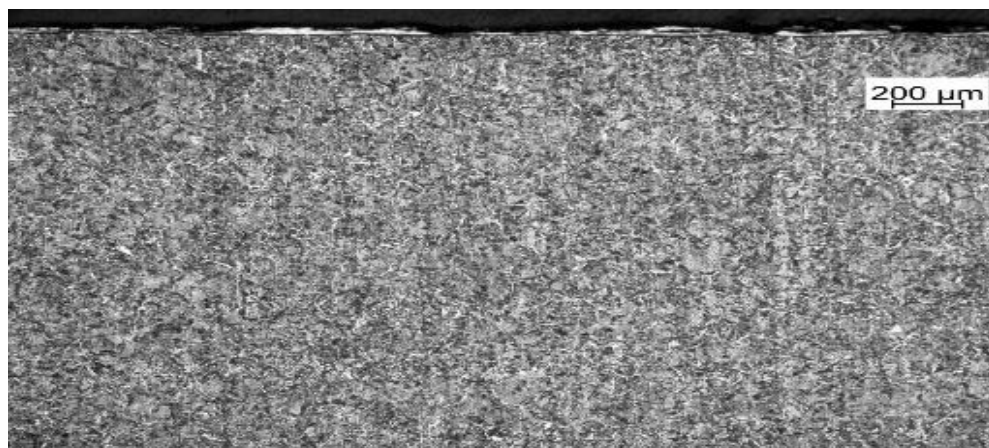




Рис. 3.5. Фрагменти мікроструктури сталі 45 (поперечний переріз) з нанесеним ЕІП сталі Р18.

Дискретність структури сформованих ЕІП обумовлена специфікою дискретного переносу маси та енергії в умовах короткочасних електричних розрядів. Основним механізмом формування такої структури є циклічне накладання одиничних лунок, кожна з яких утворюється внаслідок вибухового руйнування анода (електрода) та подальшого застигання рідкої фази на катоді (деталі). Оскільки процес має імовірнісний характер, плями контакту розподіляються нерівномірно, що призводить до виникнення мікрогеометричної неоднорідності та зон локальної несучільності.

Головним фактором, що визначає дискретність, є кінетика масопереносу: при досягненні певного часу обробки настає стан «критичного насичення», після якого накопичення металу припиняється і починається руйнування вже сформованого шару. Це пов'язано з деградацією поверхні через втому та накопичення крихких фаз, таких як вторинні карбіди при використанні електродів У10 або Р18. Термічний цикл ЕІЛ, що характеризується надвисокими швидкостями охолодження, створює значні градієнти температур, які провокують виникнення термічних напружень першого роду. Ці напруження розряджаються через утворення сітки мікротріщин, що візуально та структурно розділяють покриття на окремі фрагменти.

На ступінь дискретності суттєво впливає склад міженергетичного середовища та параметри розряду. У газовому середовищі активне окиснення рідкого металу створює оксидні плівки на межах одиничних крапель, що перешкоджає їхній коалесценції (злиттю) в монолітний шар. Крім того, гідродинамічні явища в зоні розряду, такі як відтиснення розплаву тиском пари, сприяють викиду матеріалу за межі лунки, формуючи капілярні хвилі та нерівності. При використанні легованих електродів, як-от швидкорізальна сталь Р18, нерівномірний розподіл карбідоутворюючих елементів (вольфраму, ванадію) створює хімічну неоднорідність, де тверді включення карбідів чергуються з більш пластичною матрицею, додатково посилюючи структурну дискретність зміцненого шару.

Ваговий знос досліджуваних матеріалів представлено на рис. 3.6. Встановлено, що для конструкційних сталей без покриття ваговий знос в абразивному середовищі зменшується по мірі зростання твердості матеріалу. Для сталей 30, 45 та 30ХГСА відповідно з твердістю НВ 150, 165 та 200 ваговий знос становив 0,052, 0,041 та 0,033 г.

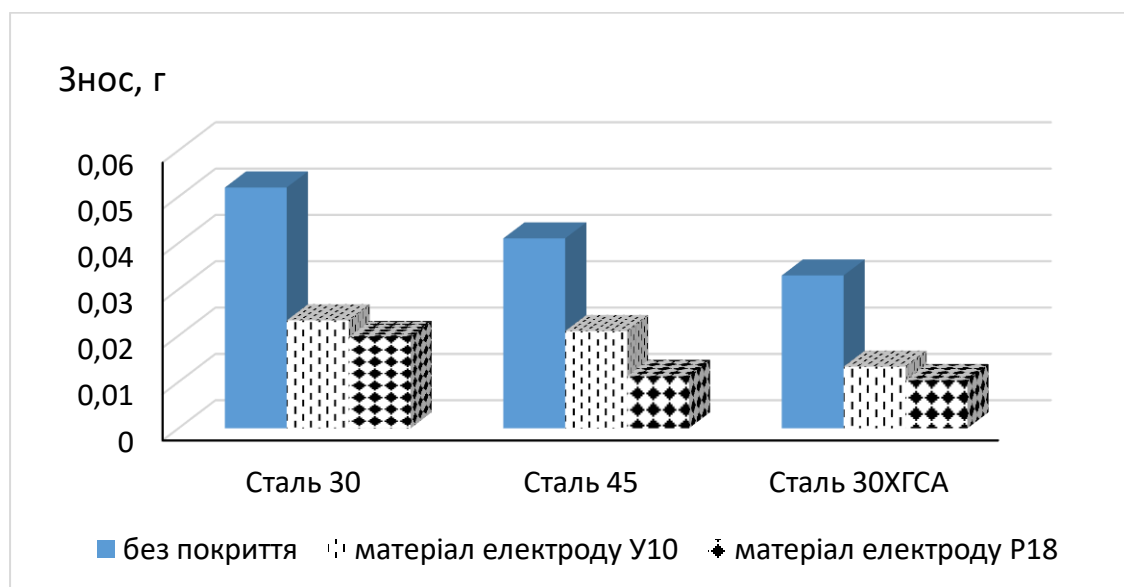


Рис. 3.6. Ваговий знос конструкційних сталей та ЕІП в абразивному середовищі.

Таким чином, збільшення вуглецю в сталі 45, в порівнянні з сталлю 30, призводить до підвищення міцності, твердості та стійкості до абразивного зношування за рахунок збільшення частки карбідів заліза в структурі сталі (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Хімічний склад в % досліджуваних конструкційних сталей								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
сталь 30 (ДСТУ 7809:2015)								
0.27-0.35	0.17-0.37	0.5-0.8	<0.3	<0.04	<0.035	<0.25	<0.3	<0.08
сталь 45 (ДСТУ 7809:2015)								
0.42-0.5	0.17-0.37	0.5-0.8	<0.3	<0.04	<0.035	<0.25	<0.3	<0.08
сталь 30ХГСА (ДСТУ 7806:2015)								
0.28-0.34	0.9-1.2	0.8-1.1	<0.3	<0.025	<0.025	0.8-1.1	<0.3	-

Найвища зносостійкість в умовах впливу абразиву середньолегованої сталі 30ХГСА обумовлена вмістом в сталі легуючих елементів марганцю та хрому, які проявляють більшу хімічну спорідненість до вуглецю та являються карбідоутворюючими елементами. Легуючі карбідоутворюючі елементи Mn та Cr, які містяться в сталі до 1,1% (табл. 3.3), розчиняються в цементиті, заміщуючи частину атомів заліза, та утворюючи легований цементит типу $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$. Зазначимо, що марганець також характеризується здатністю підвищувати міцність сталі без значного зниження пластичності, а кремній, який міститься до 1,2% в сталі 30ХГСА, сприяє отриманню дрібнозернистої структури та підвищенню міцності.

В роботі [120] зазначається, що згідно моделі Тейлора, максимальний опір пластичної деформації (τ_{max}) визначається напруженням, яке потрібно подолати, щоб забезпечити зустрічне проходження паралельних крайових дислокацій через позиції їх максимальної взаємодії. Враховуючи, що для визначення допустимих дотичних напружень найчастіше користуються теоріями міцності, виражаючи ці напруження через допустимі напруження на розтягання, приймемо $\tau_{max} \approx 0,6[\sigma]$. Тоді для сталей 30, 45 та 30ХГСА τ_{max} відповідно становить 170, 220 та 420 МПа (рис. 3.7). Таким чином, збільшення опору пластичної деформації для сталі 30ХГСА, в порівнянні з досліджуваними сталями, сприяє підвищенню її зносостійкості при впровадженні/царапанні часток абразиву.

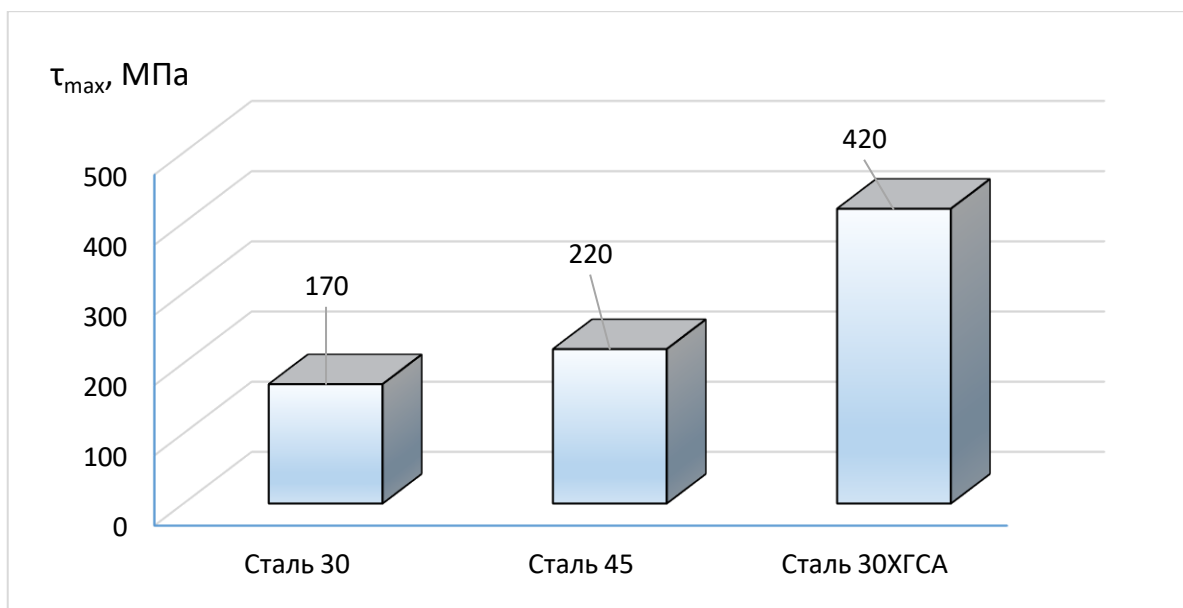


Рис. 3.7. Розрахункові допустимі дотичні напруження для конструкційних сталей.

Нанесення ЕІП забезпечує підвищення зносостійкості досліджуваних сталей в умовах впливу абразиву (рис. 3.6). Зокрема, ЕІП сталі У10 в 2.2, 1.95 та в 2.48 разів зменшує ваговий знос сталей 30, 45 та 30ХГСА відповідно. ЕІП сталі Р18 забезпечує ще більш ефективний опір поверхневих зміцнених шарів за умов впливу абразивних часток – ваговий знос сталей 30, 45 та 30ХГСА зменшується в 2.63, 3.62 та 3.17 разів.

Підвищення зносостійкості досліджуваних марок сталей при нанесенні ЕІП обумовлено зміцненням поверхневих шарів металу за рахунок формування покриттів, що характеризуються більшою часткою карбідів Fe (ЕІП з сталі У10 та Р18), W, Cr, V (ЕІП з сталі Р18).

Головною перевагою електрода зі сталі У10 є формування на поверхні "білого шару" з високим вмістом карбідів заліза (цементиту) (рис. 3.8), що суттєво підвищує мікротвердість та опір абразивному зносу при відносно низькій вартості матеріалу електрода.

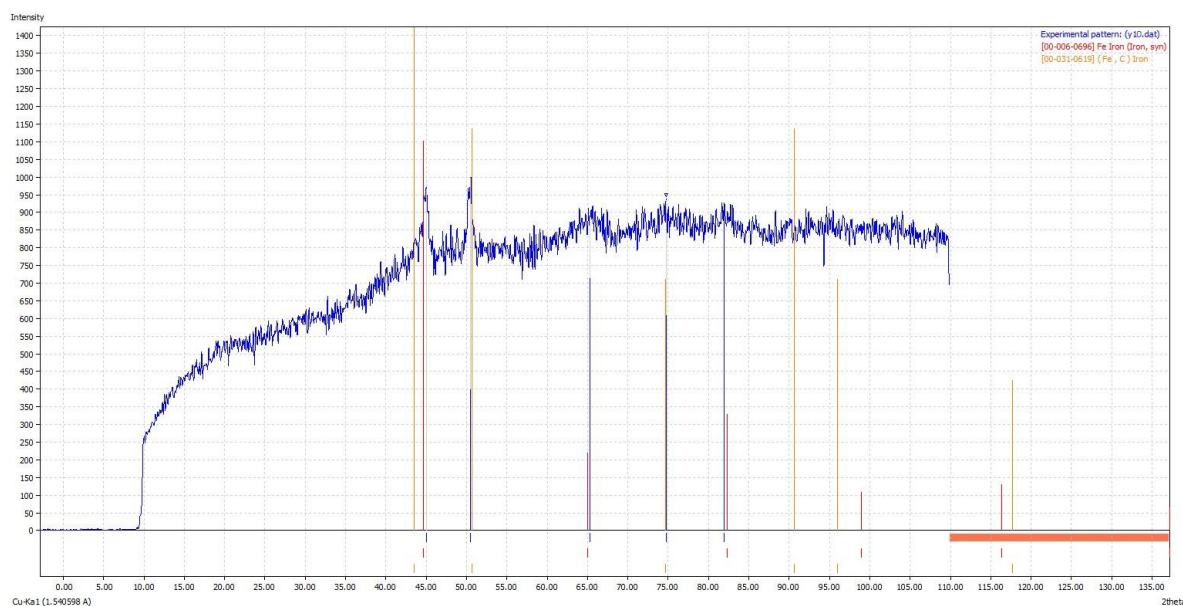


Рис. 3.8. Рентгенівська дифрактограма електроіскрового покриття сталі У10 на сталі 45 після тертя в абразивному середовищі.

Своєю чергою, сталь Р18 завдяки високому вмісту вольфраму, хрому та ванадію дозволяє створювати багатокомпонентні дифузійні шари, що містять стійкі карбіди W, Cr та V. Це не лише підвищує зносостійкість у кілька разів, але й забезпечує покриттю високу теплостійкість, що є критичним для деталей, які працюють в умовах інтенсивного нагріву.

Обидва типи електродів характеризуються високою адгезією зміцненого шару до основи за рахунок металургійного зв'язку, що виникає під час мікрозварювання при імпульсних розрядах, запобігаючи відшаруванню покриття під час експлуатації.

3.4. Динамічні процеси у поверхневих шарах деталей авіаційної техніки при терті і зношуванні в абразивному середовищі.

При роботі різноманітних машин і механізмів в абразивному середовищі можуть мати місце прояви рухів коливального характеру, які збуджуються за нестаціонарної характеристики тертя. Ці коливання мають місце або в зоні контакту абразивна частка – деталь, або в зоні, розташованій попереду контакту абразив-деталь, в напрямку руху абразивної частки. Так, у зоні контакту розвиваються нестаціонарна сила тертя, яка

приводить до автоколивань ділянки контакту абразив-деталь, а також до виникнення параметричних коливань у зоні попереду контактуючих тіл. За певному співвідношенню швидкостей проковзування та швидкостей переміщення абразивної частки по поверхні деталі, автоколивальні і параметричні рухи можуть проявитися, або зникнути, а також посилитись, чи послабитись. Ці коливання є однією з причин виникнення нерегламентованих шорсткостей (деформаційних), тріщинуватостей і утворення частинок зношування деталі, яка контактує з абразивними частинками. Фрикційні та параметричні коливання в поверхневих шарах деталей з деформаційним хвилеутворенням формують залишкові пластичні синусоїдальні нашарування металу, які зрізаються під час взаємодії абразивної частки з поверхнею деталі. Через динамічний характер взаємодії абразивна частка – деталь під час тертя, зусилля, що діють на площині контакту (поздовжні) перевищують критичне зусилля Ейлера, яке є параметричним навантаженням, у ряді випадків приводить до небезпечного параметричного резонансу. У роботі визначена область частот поблизу параметричного резонансу. Це є область динамічної нестійкості попереду рухомої абразивної частинки. У поставленій і частково вирішеній задачі розглянуті фрикційні та параметричні коливання при взаємодії абразивна частка – деталь, які ведуть до утворення деформаційних хвиль, їх часткового, чи повного зрізання, що утворює передумови до інтенсивного зношування, та послідуєчого руйнування поверхні деталі за умов роботи в абразивному середовищі.

Експлуатаційні умови поверхонь тертя, модифікованих ЕІЛ, характеризуються тим, що в зоні контактування деталей кінематичних пар можуть мати місце рухи коливального характеру (опорні поверхні підшипників, шток амортизаційної стійки шасі літака та ін.), що призводять за умов потрапляння абразивних часток в зону контакту до місцевих руйнувань за рахунок прояву поверхневими шарами деталей пластичних, а іноді крихких властивостей [123], які у ряді випадків обумовлені нестаціонарною характеристикою тертя між поверхневими шарами взаємодіючих деталей, як функцією швидкості проковзування абразивної частки по поверхні деталі [124]. Ці коливання можуть збільшуватися під час експлуатації машин та механізмів та

можуть привести до накопичення поверхневої втоми металу і місцевого крихкого та пластичного руйнування поверхневих шарів [125]. Таке руйнування може бути математично описано з урахування складових механіки суцільних середовищ та теорії дислокації [126]. Тому для вирішення такої задачі треба крім деформаційних хвильових складових ввести у рівняння поверхневого шару доданки, які включають складові, що описують ще крихкі властивості та включають багатоциклове навантаження.

Метою даної частини роботи є аналіз умов виникнення та стабілізації самозбуджувальних і параметричних процесів при динамічному навантаженні поверхневих шарів, які виникають у ділянках взаємодії абразивна частинка – поверхня деталі при терті та зношуванні під час прояву у поверхневих шарах крихких та пружно-пластичних властивостей.

Розглянемо механізм виникнення фрикційних автоколивань у зоні взаємодії абразивної частки з деталлю та параметричних коливань у зоні попереду абразивної частки рис. 3.9.

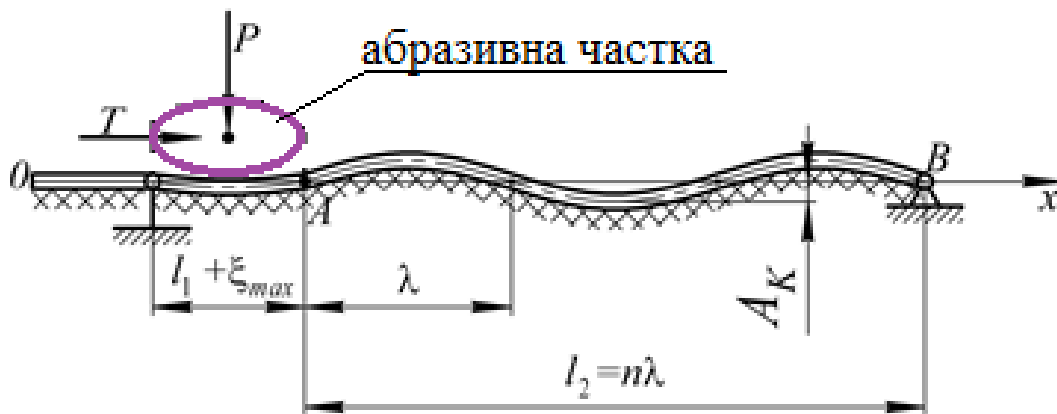


Рис. 3.9. Вплив абразивної частки на стан поверхневих шарів.

Сила (коефіцієнт) тертя між абразивною часткою та поверхнею металу, може бути апроксимована кубічною функцією швидкості проковзування абразивної частки по поверхні (рис. 3.10), причому, зазначена характеристика тертя має спадаючу ділянку, завдяки якій в коливальній системі проявляється від'ємне демпфування, що призводить

до самозбуджуваних коливань, які наростають доти, доки швидкість взаємного проковзування абразивної частки не досягне свого критичного значення (рис. 3.10).

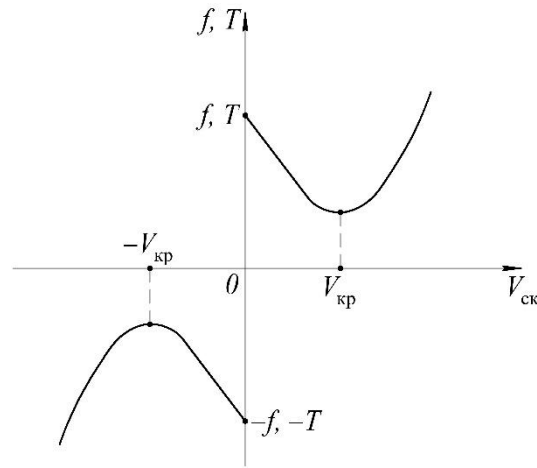


Рис. 3.10. Залежність коефіцієнта (сили) тертя від швидкості ковзання деталей.

Наявність нелінійної складової у характеристиці тертя свідчить про те, що після досягнення швидкості ковзання абразивної частинки свого критичного значення вплив цієї складової зростатиме, а також амплітуди коливань будуть знижуватися. Таким чином, тертя супроводжується автоколивальним процесом, що сприяє виникненню додаткового опору тертю та інтенсифікації втомного зносу поверхні при періодичному контактуванні її з абразивними частинками.

За даними проведених досліджень оцінки зносостійкості ЕП в абразивному середовищі було сформульовано три задачі з теорії тертя і зношування стосовно процесів, які відбуваються на поверхні абразивна частинка – матеріал поверхні з ЕП:

1. тертя і знос поверхні під дією дотичних сил, раптово прикладених до зовнішніх шарів при попаданні в зону контакту абразивної частинки;
2. тертя і знос поверхні під дією періодичних (імпульсних) сил, прикладених до зовнішніх шарів при попаданні в зону контакту абразивної частинки;
3. тертя і знос поверхні внаслідок дії дотичного навантаження, зумовленого нестационарним тертям в зоні абразивна частинка – поверхня з ЕП.

Сформульовані (і частково розв'язані) задачі є задачами з феноменологічними моделями представлення процесів тертя і зношування.

Виходячи із трьох задач, цілком імовірно, що сили тертя ковзання на ділянці контакту абразив-поверхня, автоколивання, що виникають, та параметричні ефекти в області перед абразивною частинкою між собою певним чином пов'язані. Тому для опису взаємозв'язку процесів на ділянці контакту і перед абразивною частинкою розглянемо ці дві суміжні ділянки на балці-смужці (умовно позначимо як поверхня з ЕП).

Виділимо окремо дві розрахункові схеми: перша у рамках ділянки контакту абразивна частка – поверхня, де дотична сила T розтягує балку-смужку довжиною l_1 , та друга – де дотична сила T прикладена до балки-смужки довжиною l_2 , у крайній точці A , де балка-смужка (l_2) знаходиться у зоні стискання (рис. 3.9).

Розглядаючи першу розрахункову схему можна скласти рівняння поздовжніх зміщень на ділянці контакту абразив-поверхня довжиною l_1 . Якщо $q(x, t)$ може бути визначена як функція коливального (або періодичного) характеру, то змінна $y(x, t)$ може бути визнана як поздовжнє зміщення балки-смужки під час її коливань.

Тоді рівняння поздовжніх коливань балки-смужки, навантаженої розподільним дотичним навантаженням уздовж осі Ox смужки, що лежить на пружній основі має вигляд:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{E_c F}{m} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\beta}{m} \cdot y + \frac{q}{m}, \quad (3.1)$$

де $y = y(x, t)$ – поздовжнє зміщення балки-смужки під час її деформації та коливань; $E_c F$ – поздовжня жорсткість балки-смужки; m – розподілена маса балки-смужки; β – коефіцієнт жорсткості пружної основи; $q = \frac{T}{bl_1}$ – інтенсивність розподіленого навантаження по ділянці контакту абразив-поверхня; b – ширина ділянки контакту; l_1 – довжина ділянки контакту; P – зовнішнє вертикальне навантаження на поверхню; f_0 – коефіцієнт тертя спокою; $a = \frac{3(f_0 - f_{min})}{2V_{кр}}$ – лінійний коефіцієнт характеристики тертя; $\bar{b} =$

$\frac{(f_0 - f_{min})}{2V_{кр}^2}$ – нелінійний коефіцієнт характеристики тертя; $V_{кр}$ – критична швидкість переміщення абразивної частки по поверхні, при якій $f = f_{min}$; f – коефіцієнт тертя згідно кубічній залежності від швидкості проковзування абразивної частинки [127]:

$$f = f_0 - \frac{3}{2} \cdot (f_0 - f_{min}) \cdot \frac{V_{ск}}{V_{кр}} + \frac{1}{2} \cdot (f_0 - f_{min}) \cdot \left(\frac{V_{ск}}{V_{кр}}\right)^3,$$

де $V_{ск}$ – швидкість проковзування абразивної частинки.

Рівняння (3.1) розглядаємо з урахуванням однорідних граничних умов:

$$\begin{cases} y|_{x=0} = 0 \\ \left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Вирази (3.2) являють собою граничні умови в зоні балки-смужки на ділянці під абразивною частинкою.

Окремо від умов (3.2) запишемо неоднорідну граничну умову (додаткову):

$$y|_{x=l_1} = \xi_{max}. \quad (3.3)$$

Тобто на правій межі ділянки контакту маємо величину зміщення ξ_{max} (найбільшу).

Зауважимо, що величина ξ_{max} поки не визначена.

Будемо мати на увазі, що сила $T = fP$. Тоді з урахуванням виразу $f(V_{ск})$, та коефіцієнтів a , $\bar{b}$ розв'яжемо формально рівняння (3.2) відносно функції $y(x, t)$, та будемо вважати це рішення наближеним:

$$y(x, t) = -\frac{m}{\beta} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{E_c F}{\beta} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{mP}{bl_1 \beta} \cdot \left[f_0 - a \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \bar{b} \cdot \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^3 \right]. \quad (3.4)$$

Тоді у праву частину (3.4) підставимо наближене значення $y_1(x, t)$, яке шукаємо у вигляді:

$$y_1(x, t) = \sum_{i=1}^n Y_1(x) z_1(t) = (C_1 \cos P_n x + C_2 \sin P_n x) \cdot \frac{v_0}{P_0} \sin P_0 t. \quad (3.5)$$

де $C_1 = 0$; $C_2 = \frac{\xi_{max}}{\sin \sqrt{\frac{mP^2 - \beta}{E_c F}} \cdot l_1}$ – довільні сталі величини, визначені за допомогою (3.5), для

першої власної форми коливань; $z_i(t)$ – часова складова функції $y_1(t)$ [3] ($i = 1, 2, 3, \dots$).

Для першого наближення $z_1(t) = \frac{v_0}{P_0} \sin P_0 t$, де v_0 – початкова швидкість проковзування абразивної частинки; P_0 – власна частота коливань абразивної частинки.

Тоді

$$y_1(x, t) = \frac{\xi_{max}}{\sin \sqrt{\frac{mP^2 - \beta}{E_c F}} l_1} \sin \sqrt{\frac{mP^2 - \beta}{E_c F}} \cdot x \cdot \frac{v_0}{P_0} \sin P_0 t. \quad (3.6)$$

Після підстановки виразу (3.5) у рівняння (3.4) і нехтуванням складовими перехідного процесу запишемо вираз для переміщення ξ_{max} :

$$\xi_{max} = \frac{mP}{bl_1\beta} \cdot [f_0 - \xi_{max} v_0 a \cos P_0 t + \xi_{max}^3 v_0^3 \bar{b} \cos^3 P_0 t]. \quad (3.7)$$

Приймаємо $t = 0$ тоді переміщення ξ_{max} визначимо із кубічного рівняння, яке має три рішення, за формулою Кардано, одне з них має найбільший дійсний корінь – це буде переміщення ξ_{max} :

$$\xi_{max}^3 - \xi_{max} \left(\frac{a}{\bar{b}v_0^2} + \frac{bl_1\beta}{mP\bar{b}v_0^3} \right) + \frac{f_0}{\bar{b}v_0^3} = 0. \quad (3.8)$$

Рішення (3.8) має три дійсних кореня, якщо $D < 0$, та маємо один дійсний корінь, якщо $D > 0$. При цьому дискримінант запишемо у вигляді:

$$D = \frac{f_0^2}{4\bar{b}^2v_0^2} + \left(\frac{a}{3\bar{b}v_0^2} + \frac{bl_1\beta}{3mP\bar{b}v_0^3} \right)^3. \quad (3.9)$$

Таким чином визначено найбільше переміщення балки-смужки l_1 під абразивною частинкою в зоні контакту при її деформаціях і коливаннях. Будемо вважати, що при повздовжній деформації балки-смужки довжина ділянки l_1 збільшиться до значення $l_1 + \xi_{max}$, а довжина ділянки l_2 збільшиться до значення $l_2 + \xi_{max}$. ξ_{max} піде на приріст відрізка l_2 , та розвиток хвилеподібної деформації смужки l_2 , де деформація відрізка l_2 складе n напівхвиль. Таким чином на ділянці l_2 балка-смужка стане хвилеподібною, а висоту гофрів будемо вважати деформаційними мікронерівностями. Для визначення висоти гофрів деформованої ділянки l_2 треба попередньо розрахувати довжину та кількість мікрохвиль ділянки l_2 .

З метою визначення стрілки прогину ділянки l_2 припустимо, що балка-смужка втратила повздовжню стійкість (відбулось розшарування на межі ЕП-основа). Тому як це впливає із [128], довжина напівхвилі стрижня дорівнює:

$$\lambda = \frac{\pi}{\alpha} = \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{4E_c I}{E}}, \quad (3.10)$$

де α – число напівхвиль деформації ділянки балки-смужки довжиною π , що втратила повздовжню стійкість, тому як це впливає з [128] довжина напівхвиль деформації стрижня може бути знайдена через модуль пружності матеріалу ЕП та модуля пружності матеріалу основи, а також момент інерції балки-смужки; I – момент інерції поперечного перетину балки-смужки; E – модуль пружності матеріалу основи; E_c – модуль пружності матеріалу ЕП.

Тоді коефіцієнт гнучкості стрижня на пружній основі дорівнює:

$$r = \frac{\beta}{EI} = \frac{E}{2l} \alpha = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{4E_c I}}, \quad (3.11)$$

де $l = l_2$ – невідома довжина балки-смужки; β – жорсткість пружної основи балки-смужки за рахунок пружності поверхневих шарів матеріалу основи.

Коефіцієнт гнучкості стрижня на пружній основі може бути ув'язаний з довжиною ділянки l_2 та кількістю напівхвиль n ділянки при втраті її повздовжньої стійкості:

$$r = \frac{\pi^4}{l^4} n^4 (n + 1)^2, \quad (3.12)$$

або з урахуванням виразу (11) отримаємо:

$$\frac{1}{2l_2} \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{4E_c I}} = \frac{\pi^4}{l_2^4} n^4 (n + 1)^2. \quad (3.13)$$

Вираз (3.13) перетворимо до квадратного рівняння:

$$n^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{E}{4E_c I} \right) - 2n \frac{E}{4E_c I} - \frac{E}{4E_c I} = 0. \quad (3.14)$$

Розв'язок (3.14) має вигляд:

$$n = \frac{E}{4E_c I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} - \frac{E}{4E_c I}\right)} + \sqrt{\frac{E^2}{16E_c^2 I^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} - \frac{E}{4E_c I}\right)^2} + \frac{E}{4E_c I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{2} - \frac{E}{4E_c I}\right)}}. \quad (3.15)$$

Деформована частина балки-смужки, попереду від абразивної частинки набуває синусоїдальної форми і зміщується в бік переміщення абразиву у вигляді рухомої (деформаційної) хвилі довжиною l_2 зі швидкістю v_0 .

Форма хвилі встановлюється після втрати балкою-смужкою повздовжньої стійкості.

Звертаючись до балки-смужки перед впровадженням абразивної частинки у ділянку l_2 бачимо, що ця ділянка навантажена дотичною силою T . Дотична сила T розтягає ділянку балки-смужки l_1 і стискає ділянку балки-смужки l_2 . У результаті дії дотичної сили ділянка l_2 отримує поздовжній вигін, і у ряді випадків втрату поздовжньої стійкості. Повздовжній вигін балки-смужки описуємо за допомогою наступного рівняння для поверхневого шару у часткових похідних:

Згідно з [127] $v(x, t) = \sum_{k=1}^n z_k(t) \sin \frac{k\pi x}{l_2}$ – поперечний прогин балки-смужки при повздовжньому вигині (для випадку шарнірного опирання балки-смужки); β – коефіцієнт віддачі (жорсткість) пружної основи балки-смужки за рахунок пружності глибинних шарів деталі; I – момент інерції поперечного перетину балки-смужки; $T(x, t) = T_A(x, t) = \frac{P}{bl_1} \cdot [f_0 - \xi_{max} a \cos P_0 t + \xi_{max}^3 v_0^3 \bar{b} \cos^3 P_0 t]$ – граничне значення дотичної сили балки-смужки.

Підставимо вирази $v(x, t)$ і $T(x, t)$ в диференціальне рівняння [127] отримаємо сукупність диференціальних рівнянь у простих похідних:

$$\ddot{z}_k + \omega_{0k}^2 [1 - \alpha_k \cos P_0 t + \beta_k \cos^3 P_0 t] z_k = 0. \quad (3.16)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$ – прості цілі числа; $\omega_{0k}^2 = E_c I \cdot \left(\frac{\pi^4 k^4}{ml_2^4} + \frac{\beta}{m} - \frac{\pi^2 k^2}{ml_2^2} \cdot \frac{P}{bl_1} \cdot f_0 \right)$ – квадрат власної частоти коливань навантаженої постійним значенням дотичної сили; α_k, β_k – постійні коефіцієнти характеристики тертя:

$$\alpha_k = \frac{\pi^2 k^2}{ml_2^2} \cdot \frac{P}{bl_1} \cdot \xi_{max} v_0 a \cdot \frac{\beta m l_2^2 b l_1}{E_c I k^4 \pi^4 b l_1 + \beta l_2^4 b l_1 + \pi^2 k^2 P l_2^2 f_0}$$

$$\beta_k = \frac{\pi^2 k^2}{ml_2^2} \cdot \frac{P}{bl_1} \cdot \xi_{max}^3 v_0^3 \bar{b} \cdot \frac{\beta m l_2^2 b l_1}{E_c I k^4 \pi^4 b l_1 + \beta l_2^4 b l_1 + \pi^2 k^2 P l_2^2 f_0}$$

Позначимо функцію $\varphi_k(t)$, яка являє собою параметричне навантаження на коливальну систему, з рівняння (3.16):

$$\varphi_k(t) = \beta_k \cos^3 Pt - \alpha_k \cos Pt, \quad (3.17)$$

якщо виконується умова [129]:

$$\left| \frac{\varphi'_k}{\varphi_k} \right| + \frac{\omega_{0k}}{2\pi} \ll 1. \quad (3.18)$$

Тоді запишемо рівняння (16) у формі:

$$\ddot{z}_k(t) + \omega_{0k}^2 [1 + \mu \varphi_k(t)] z_k(t) = 0. \quad (3.19)$$

Якщо умова (3.18) не виконується, то функція $\varphi_k(t)$ визначається згідно з [129] без спрацювання перетворення за рахунок безпосереднього інтегрування. Відповідно рішення (3.19) представимо у формі:

$$z_k(t) = A_k \cos \Psi_k. \quad (3.20)$$

де $\Psi_k = \omega_{0k}t + \Theta_k$ – змінна часу; A_k – амплітуда деформаційних хвиль для k -тої гармоніки; Θ_k – початкова фаза для k -тої гармоніки.

Тоді з урахуванням породжувального рішення, згідно [129] маємо:

$$A_k(t) = B_k \exp \left[-\frac{\mu_k}{4} \varphi_k(t) \right] \approx B_k \left[1 - \frac{\mu_k}{4} \varphi_k(t) \right], \quad (3.21)$$

де B_k – постійна стала, яка визначається за початкових умов; μ_k – постійний параметр, який задається із діапазону $0 < \mu_k \leq 1$, приймаємо $\mu_k = 1$, з урахуванням значення B_k .

Далі, користуючись простими міркуваннями, визначимо умову, при якій параметричні коливання у системі не відбудуться. Розглянемо вираз у квадратних дужках (3.21), якщо його прирівняти до нуля, одержимо трансцендентне рівняння:

$$\beta_k \cos^3 Pt - \alpha_k \cos Pt + 1 = 0. \quad (3.22)$$

Розв'яжемо (3.22) відносно $\eta = \cos Pt$, отримаємо дійсні значення змінної η , при яких функції $z_k(t)$ будуть дорівнюватись нулеві.

Запишемо замість (3.22) рівняння відносної змінної η :

$$\eta^3 - \frac{\alpha_k}{\beta_k} \eta + \frac{1}{\beta_k} = 0, \quad (3.23)$$

яке набуде рішення:

$$\eta = \sqrt[3]{-\frac{1}{2\beta_k} + \sqrt{\frac{1}{4\beta_k^4} + \left(\frac{\alpha_k}{3\beta_k}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2\beta_k} - \sqrt{\frac{1}{4\beta_k^4} + \left(\frac{\alpha_k}{3\beta_k}\right)^3}}, \quad (3.24)$$

де $\eta = 1, 2, 3, \dots$ – номер форм коливань, для яких встановлюються зони відсутності коливальних рухів.

При розгляді параметричних коливань важливим залишається питання визначення діапазону частот, у якому настає нестійкий стан системи ЕПП-основа, де розвиваються параметричні коливання, та у деяких випадках – параметричний резонанс.

Як впливає з роботи [130] критичний стан настає, коли параметричне рівняння навантаження набуває вигляду функції Мат'є і за модулем дорівнює, або перевищує критичну силу Ейлера. Так як друга частина параметричного навантаження у формі Хілла на розвиток параметричних коливань та резонансу не впливає, то при визначенні критичних частот орієнтуємось на рішення та результати, отримані при розв'язанні рівняння Мат'є [131].

Таким чином, після проведення перетворень зазначимо, що області динамічної нестійкості розташовуються навколо частот, які параметрично збуджуються

$$\Theta_{*k} = \frac{2\omega_{0k}}{k} \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (3.25)$$

де Θ_{*k} – власна частота k -тої форми параметричних коливань при впровадженні абразивної частки в поверхневі шари ЕПП; ω_{0k} – власна частота коливань балки-смужки для форми коливань з індексом k .

Таким чином головний параметричний резонанс настає при співвідношенні частот

$$\Theta_* = 2\omega_0, \quad (3.26)$$

при $k = 1$ (якщо $k = 2, 3, 4, \dots$ – то виконується (3.25)).

Зауважимо, що при самозбуджувальних та параметричних коливаннях в поверхневих шарах ЕПП (суцільної та дискретної природи) виникають деформаційно-хвильові мікронерівності, які відразу після їх виникнення можуть бути зрізані абразивною часткою, що рухається. Тому деформаційні мікронерівності навіть за відсутності параметричного резонансу та роботи в пружній області схильні до

безперервних знакозмінних переміщень, тобто поверхневі шари модифікованих ЕІЛ деталей перебувають у стані багатоциклових втомних навантажень. Причому амплітуди коливань деформаційних хвиль поверхневих шарів ЕІП перевищують відповідні амплітуди коливань, підповерхневих шарів (основи). Тому такі деформації спричиняють відрив ЕІП від матеріалу основи. Причому у зовнішніх шарах ЕІП внаслідок їх крихких властивостей спостерігається граничне тріщиноутворення, та локальне руйнування, що приводить до їх інтенсивного зношування при багатоцикловому попаданні абразивної частинки в зону контакту. При цьому поверхневі шари матеріалу основи добре сприймають деформацію об'ємного стиснення в наслідок домінування їх пружно-пластичних властивостей.

Висновки до розділу 3.

1. Проаналізовано, що підвищення вмісту вуглецю в сталі 30, 30ХГСА, 45) збільшує її міцність, твердість та стійкість до абразивного зношування за рахунок збільшення частки карбідів заліза. Зношування сталей без покриття підпорядковується закономірності: чим вище твердість матеріалу, тим менший його ваговий знос в абразивному середовищі (наприклад, ваговий знос сталі 30ХГСА (200 НВ) становить 0,033 г, тоді як сталі 30 (150 НВ) – 0,052 г). Експериментально доведено зростання стійкості до абразивного зношування сталі 45 за рахунок збільшення частки карбідів заліза, в порівнянні з сталлю 30. Вміст легуючих елементів Mn та Cr у сталі 30ХГСА (до 1,1%) підвищує її зносостійкість за рахунок більшої хімічної спорідненості до вуглецю та утворення легованого цементиту типу $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$.

2. Сформовані ЕІП характеризуються дискретною (острівковою) структурою з різною товщиною локальних шарів (від ~ 40 мкм до 3-6 мкм). Основний механізм формування такої структури полягає в циклічному накладанні одиничних лунок, кожна з яких утворюється внаслідок вибухового руйнування анода (електрода) та подальшого швидкого застигання рідкої фази на катоді (деталі). Оскільки процес має імовірнісний

характер, плями контакту розподіляються нерівномірно, що призводить до виникнення мікрогеометричної неоднорідності та зон локальної несучільності

3. Експериментально встановлено, що електроіскрове легування значно підвищує зносостійкість конструкційних сталей (сталь 30, 45 та 30ХГСА) в абразивному середовищі, що обумовлено формуванням на поверхні зміцненого шару з новою фазовою структурою. Визначено, що відносна зносостійкість залежить від матеріалу електроду: найвищий показник (3,0) досягається при використанні сплаву Т15К6, далі йдуть ВК8 (2,9), Р18 (2,3) та У10 (1,96) (за еталон прийнято сталь 45 з показником 1).

4. Механізм підвищення зносостійкості покриттів ВК8 та Т15К6 полягає у створенні гетерогенної структури, яка поєднує високу твердість армуючих фаз (карбіди вольфраму WC та титану TiC) із в'язкістю матриці (кобальт), що створює бар'єри для руху дислокацій та запобігає крихкому сколюванню.

5. ЕІП зі сталі Р18 забезпечує більш ефективний опір абразивному зносу, зменшуючи ваговий знос сталей 30, 45 та 30ХГСА в 2,63, 3,62 та 3,17 рази відповідно. Присутність карбідоутворюючих елементів, таких як вольфрам, ванадій та хром, підвищує не тільки зносостійкість, але й теплостійкість покриття. Механізм опору абразиву полягає в тому, що ці тверді карбіди виступають у ролі бар'єрів, які перешкоджають мікрорізанню та пластичній деформації поверхні абразивними частинками.

6. Підвищення зносостійкості сталей з ЕІП зі сталі Р18 (на 24% для сталі 30ХГСА та на 50% для сталі 45 порівняно з покриттями зі сталі У10) пояснюється наявністю в покритті значної кількості складних карбідів вольфраму Fe_3W_3C (Me_6C) та карбідоутворюючих елементів V та Mo. Підвищення опору зношуванню в абразивному середовищі ЕІП зі сталі Р18 обумовлено наявністю карбідів та карбідоутворюючих елементів загальною кількістю до 28%.

5. Найвища зносостійкість серед досліджених ЕІП на конструкційних сталях 30ХГСА та 45 в абразивному середовищі досягається при використанні вольфрамокобальтового сплаву ВК8. Ця закономірність пояснюється поєднанням

властивостей армуючих фаз та матриці: сплав ВК8 містить 92% карбіду вольфраму WC, які утворюють гетерогенну структуру. Механізм підвищення зносостійкості полягає в тому, що високотверді карбіди вольфраму WC, а також напівкарбід вольфраму W_2C і β -карбід вольфраму WC_{1-x} виступають у ролі ефективних бар'єрів для руху дислокацій та запобігають мікрорізанню абразивними частинками. Водночас, наявність пластичної кобальтової зв'язки дозволяє дисипувати енергію механічного впливу, запобігаючи крихкому сколюванню та руйнуванню твердих частинок. В результаті спостерігається перехід від інтенсивного абразивного зношування до режиму стабільного тертя, що візуально підтверджується зменшенням кількості та глибини борозен на поверхні. Кількісно це підтверджується тим, що ваговий знос ЕП з ВК8 на сталі 30ХГСА в 1,8 рази менший, ніж у сталі без покриття, а відносна зносостійкість досягає показника 2,9 для сталі 45 (при еталоні 1).

6. Доведено, що крихке руйнування є домінуючим механізмом зношування для покриттів із високовуглецевої сталі У10 та кераміки ЦЛАБ-1, що обумовлено для ЕП сталі У10 наявністю карбіду заліза до 16% в структурі сталі та наявністю крихкої боридної складової ZrB_2 у ЦЛАБ-1.

7. Проаналізовано, що при динамічному навантаженні абразивна частка-покриття-основа значно зростає роль параметричних та автоколивальних процесів на розвиток багатоциклових напружень і деформацій на ділянках балок-смужок (покриття) під абразивною часткою, та попереду неї що приводить до інтенсифікації зношування.

8. Для дослідження нестационарних процесів у зовнішніх шарах ЕП застосовано розрахункову схему, де поверхневі шари модифікованої ЕП основи представлені як анізотропні пластини на пружній основі і навантажені дотичною силою, обумовленою змінним коефіцієнтом тертя, яка за модулем може перевершити критичне зусилля (Ейлера).

9. Виявлені причини виникнення динамічно нестійких станів балки-смужки (ЕП), при яких можливі порушення цілісності ЕП за рахунок проявлення закритичних напружень та деформацій у матеріалі зовнішніх шарів при взаємодії деталь-абразив.

10. Отримано результати визначення небезпечних станів ЕП при дії нестационарних навантажень у початкові моменти взаємодії покриття-абразив, а також у моменти закінчення ефекту проковзування абразиву або в моменти вирівнювання швидкостей руху при коливаннях.

11. Поставлена та вирішена третя динамічна задача для ЕП, представлених у вигляді крихкої балки-смужки на пружній основі, навантаженою дотичною силою, обумовленою нестационарним тертям у зоні контакту абразив-покриття, яка призводить до тріщиноутворення та передчасного зношення ЕП.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ АБРАЗИВУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ

4.1. Оцінка зносостійкості сталей марок 45, 40Х та 30ХГСА в нормалізованому стані та зміцнених ЕП в абразивному середовищі залежно від розміру абразиву.

Зернистість абразиву (розмір частинок) суттєво впливає на знос сталей, де зі збільшенням розміру абразивних частинок інтенсивність зношування зростає [132]. Більш великі частинки спричиняють глибше дряпання та мікрорізання, тоді як дрібніші призводять до втомного зношування. При досягненні критичного розміру знос стабілізується [133].

Вплив розміру абразивних часток на зносостійкість сталей є багатофакторним процесом, який залежить як від властивостей самого матеріалу (марки сталі, структури), так і від наявності захисних покриттів або модифікацій.

В даному розділі представлений аналіз кількісних показників зносу для сталей 40Х, 30ХГСА та 45, як у вихідному стані, так і з покриттями сплаву ВК8 та сталі Р18, при використанні абразиву розміром 250 мкм та 500 мкм.

Порівняння кількісних показників зносу (ваговий знос у грамах), наведених на графіках, показує чітку залежність даного параметру від розміру абразиву для всіх трьох досліджуваних марок сталі.

Збільшення розміру абразиву вдвічі (з 250 мкм до 500 мкм) призводить до суттєвого зростання зносу для сталей 45, 40Х та 30ХГСА в 5.47, 5.0 та 3.6 разів відповідно. Найбільш стійкою до великодисперсних частинок абразиву (500 мкм) виявилася сталь 30ХГСА, тоді як сталі 40Х та 45 показали майже однакові високі значення зносу.

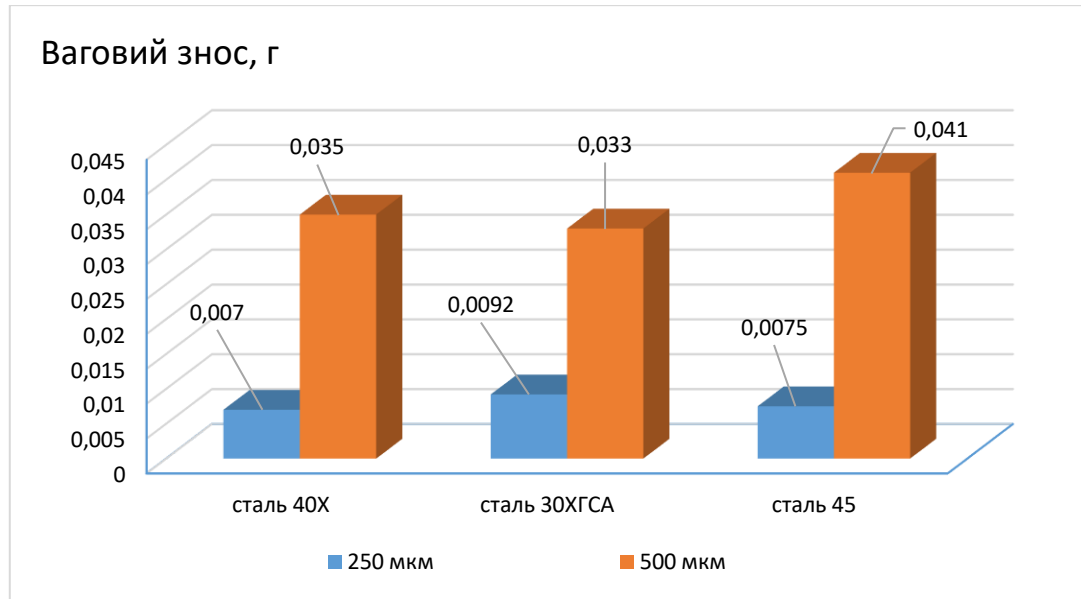


Рис. 4.1. Ваговий знос сталей залежно від розміру абразиву.

Стійкість досліджуваних марок сталей в абразивному середовищі безпосередньо обумовлена як твердістю матеріалу, так і особливостями структури після нормалізації сталей (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Типові значення твердості за Бринеллем (НВ) сталей після нормалізації

Марка сталі	Твердість (НВ)	Особливості структури
45	170...220	Має феритно-перлітну структуру. Твердість забезпечується переважно вмістом вуглецю
40X	170...217	Хромиста сталь, феритно-перлітна структура. Порівняно зі сталлю 45, перлітна складова у 40X більш дисперсна завдяки впливу хрому, який гальмує дифузійні процеси при охолодженні. Хром частково розчиняється у фериті, зміцнюючи його, та входить до складу карбідів. Це забезпечує більш рівномірний розподіл структурних складових, ніж у звичайних вуглецевих сталях.
30XГСА	200 – 229	Після нормалізації сталь 30XГСА має феритно-перлітну структуру, з наступними особливостями: - завдяки марганцю та хрому, які знижують швидкість розпаду аустеніту, перліт утворюється у подрібненому (сорбітоподібному) вигляді, що забезпечує підвищення міцності структури, порівняно з сталлю 45; - структура складається з надлишкового фериту та тонкопластинчастого перліту. Легуючі елементи (особливо кремній) зміцнюють ферит, підвищуючи його межу плинності.

Після нормалізації розмір зерна сталей 45, 40Х та 30ХГСА відповідає 6–9 номеру (ДСТУ ISO 643), однак легуючі елементи спричиняють певні особливості мікроструктури.

Аналіз мікроструктури встановив, що для сталі 45 зерно найбільш схильне до росту. Оскільки в даній марці сталі відсутні сильні бар'єри для дифузії, після нормалізації вона характеризується найбільшим розміром зерен (~40 мкм), неоднорідною структурою, чіткими виділеннями феритної сітки (рис. 4.2, а).

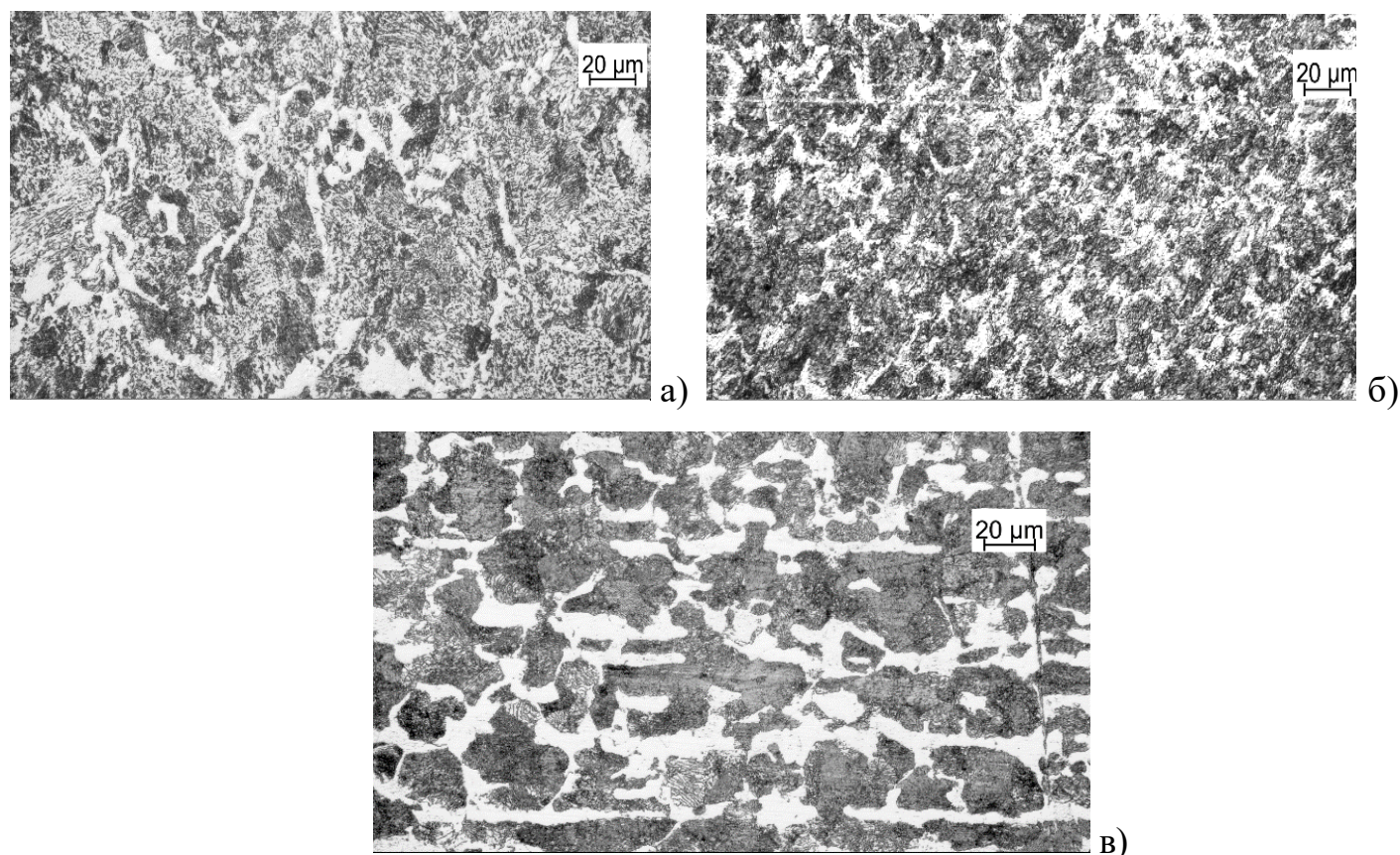


Рис. 4.2. Мікроструктура сталей в нормалізованому стані: а) – сталь 45, б) – сталь 40Х, в) – сталь 30ХГСА.

Найбільший знос сталі 45 обумовлений «викришуванням» та розвитком сітки мікротріщин розміром від 10 до 35 мкм в поверхневих шарах сталі при впровадженні в них твердих абразивних часток в процесі тертя (рис. 4.3).

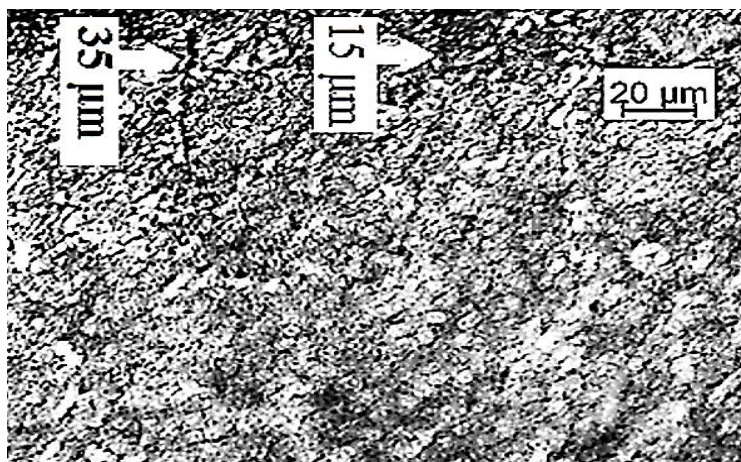


Рис. 4.3. Формування сітки мікротріщин на поверхні сталі 45 при терті в абразивному середовищі.

Нормалізація сталі 40Х дозволяє отримати більш дрібне та однорідне зерно ($\sim 22 \dots 30$ мкм) (рис. 4.2, б). Механізм цього процесу полягає в наступному: хром ($0,80 \dots 1,10\%$ в сталі 40Х) є феритотвірним елементом, який при нагріванні утворює стійкі карбіди; карбіди хрому механічно перешкоджають переміщенню меж зерен аустеніту, що ефективно стримує їх ріст; завдяки гальмуванню рекристалізації, після нормалізації сталь 40Х отримує дрібнозернисту структуру. Дрібне зерно сталі 40Х забезпечує кращу ударну в'язкість, порівняно зі сталлю 45, однак в умовах абразивного зношування дана марка сталі характеризується незначним підвищенням зносостійкості.

Для легованої Cr, Mn, Si сталі 30ХГСА встановлено найбільше подрібнення структури після нормалізації (зерно $\sim 15 \dots 20$ мкм) (рис. 4.2, в). Оскільки межі зерен слугують бар'єром для розвитку мікротріщин, що виникають під ударами абразиву, дрібнозерниста структура забезпечує підвищення абразивної стійкості сталі 30ХГСА в 1,55 разів, в порівнянні з іншими досліджуваними марками сталей.

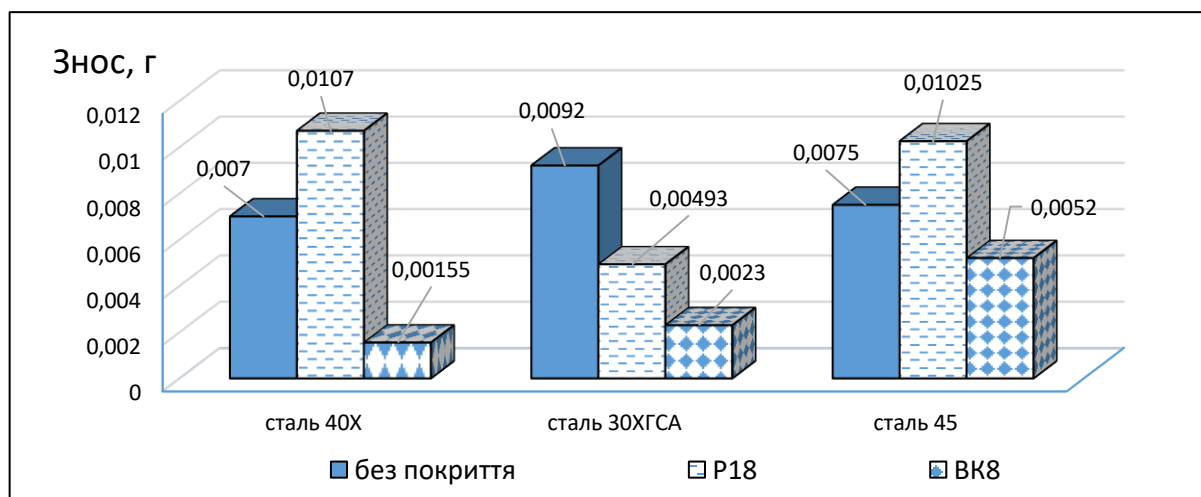
Оцінка мікроструктури розглянутих марок сталі, розмір зерна після нормалізації є базовими показниками для подальшого ЕІЛ. Оскільки при ЕІЛ відбувається локальне мікрозагартування та легування поверхневих шарів основи, кінцева твердість поверхні основи буде значно вищою, проте нормалізована основа визначає, наскільки добре

зміцнений шар основи під ЕІП буде чинити опір продавлюванню великими частками абразиву при руйнуванні ЕІП.

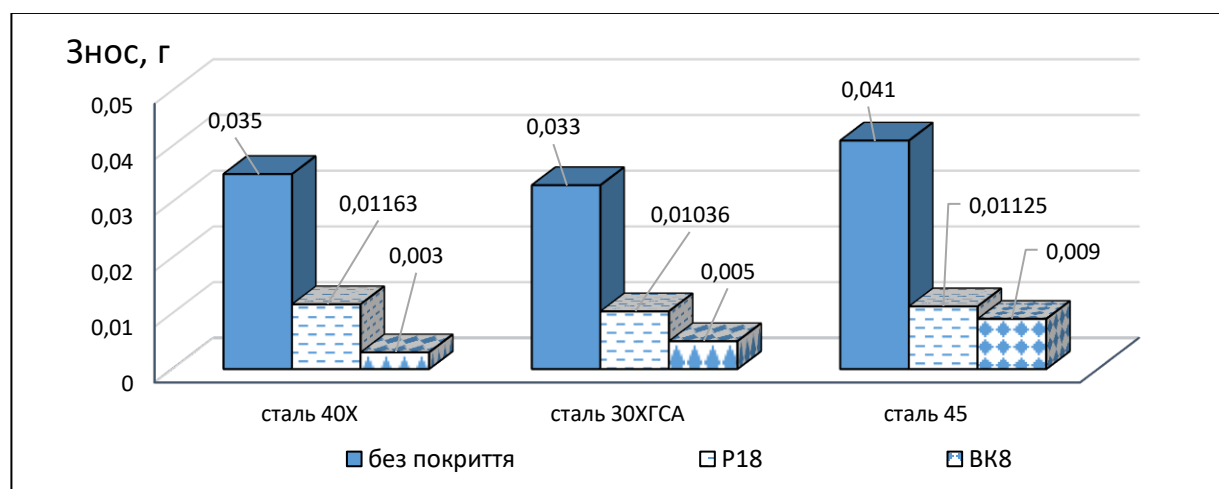
Нанесення зміцнюючих покриттів (твердого сплаву ВК8 та швидкорізальної сталі Р18) суттєво змінює процес зношування. Ці покриття створюють на поверхні сталі твердий шар, який протистоїть проникненню абразивних часток.

Нанесення електроіскрових покриттів електродами ВК8 та Р18 проводилось при постійному струмі 1А, час нанесення – 10 хвилин, при цьому середній питомий час обробки сталевго зразку розміром 3.0х3.0 см становив 1 хв/см².

Оцінка вагового зносу сформованих ЕІП проводилась в абразивному середовищі при фракціях з максимальним розміром абразиву 500 та 250 мкм (рис. 4.4).



а)



б)

Рис. 4.4. Знос в абразивному середовищі сталі, модифікованої ЕІП: а) – розмір абразиву 250 мкм, б) – розмір абразиву 500 мкм.

Переважно зразки з ЕІП ВК8 та Р18 демонструють зменшення показників вагового зносу у рази, порівняно з немодифікованими електроіскровим легуванням сталями 40Х, 30ХГСА та 45 (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Зменшення вагового зносу сталей електроіскровим легуванням

Розмір абразиву, мкм	Марка сталі	ЕІП ВК8 (зменшення в рази)	ЕІП Р18 (зменшення в рази)
250	сталь 40Х	4,52	0,65
	сталь 30ХГСА	4,00	1,87
	сталь 45	1,44	0,73
500	сталь 40Х	11,67	3,01
	сталь 30ХГСА	6,60	3,19
	сталь 45	4,56	3,64

При терті ЕІП Р18 на сталях марок 40Х та 45 в абразивному середовищі з максимальним розміром абразиву до 250 мкм не встановлено підвищення зносостійкості зміцнених поверхонь, навпаки, інтенсивність абразивного зношування зростає. Особливістю поверхонь, зміцнених ЕІП зі сталі Р18, є висока дискретність покриття з максимальною висотою дискретних ділянок покриття до 30...33 мкм (рис. 4.5), висока твердість покриття, мікроструктурна неоднорідність та різкий градієнт механічних властивостей від покриття до основи (від 16ГПа до 4ГПа). Ці характеристики визначають специфіку контактних механізмів при абразивному середовищі за наявності різних розмірів частинок [134]. Згідно з класичними уявленнями про абразивне зношування, при малих розмірах частинок домінує механізм мікрорізання, за якого гострі краї абразиву локально концентрують напруження та ефективно зрізають матеріал поверхні [135]. Для твердих, але крихких поверхневих шарів, характерних для ЕІП-покриттів, такий режим взаємодії сприяє ініціюванню мікротріщин і крихкому викришуванню карбідних фаз [136]. В роботі [137] показано, що при зменшенні розміру

абразивних частинок інтенсивність зношування може зростати саме внаслідок переходу від механізмів плугування до різального режиму, особливо для багатофазних та структурно неоднорідних матеріалів.

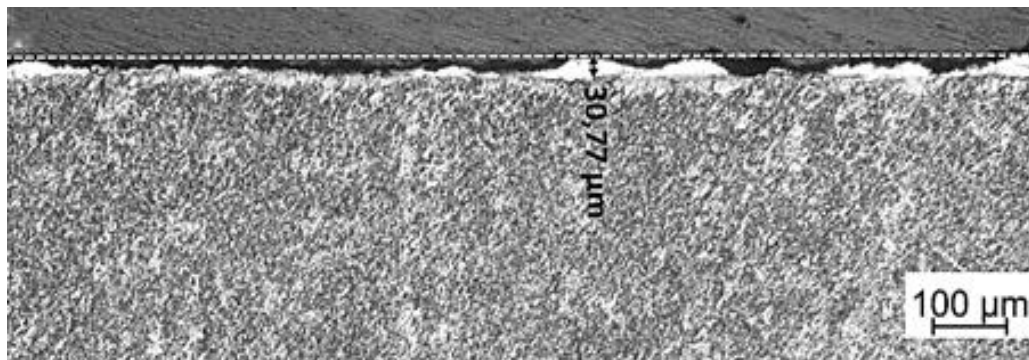


Рис. 4.5. Острівковий характер ЕП сталі Р18.

Отже, в випадку ЕП Р18 встановлено, що при терті в умовах дрібного абразиву дане покриття схильно до прискореного викришування. Механізмом підвищення абразивного зношування є наявність характерного для ЕП мікрорельєфу з кратерами та порами, у яких дрібні абразивні частинки можуть фіксуватися, підвищуючи ефективність різального впливу.

При збільшенні максимального розміру абразивних частинок до ~ 500 мкм встановлено зменшення інтенсивності зношування зміцнених поверхонь. Така зміна зносостійкості спричинена зміною домінуючих механізмів руйнування ЕП.

Зі зростанням розміру абразиву зменшується ймовірність реалізації процесу мікрорізання, а контакт абразив-ЕП набуває характеру вдавлювання та плугування, за якого матеріал деформується без інтенсивного відокремлення частинок зносу. За умов високої твердості шару ЕП глибина вдавлювання крупних частинок абразиву обмежується, що знижує інтенсивність знімання матеріалу. Подібні закономірності встановлені також у роботі [138], де показано, що при збільшенні розміру та притупленні абразивних частинок відбувається перехід до режиму плугування, який характеризується значно меншою питомою інтенсивністю зношування.

Таким чином, при використанні крупнодисперсного абразиву перевага високої твердості зміцненого шару реалізується повніше, ніж у випадку дрібного абразиву, що забезпечує зменшення загального зносу. Дана закономірність експериментально підтверджена лише для ЕП Р18 на сталях 40Х та 45. Для всіх інших випадків збільшення розміру абразиву з 250 до 500 мкм посилює інтенсивність руйнування поверхневого шару ЕП.

Покриття ВК8 (на основі карбіду вольфраму) виявилося більш ефективним для підвищення зносостійкості в абразивному середовищі, ніж покриття Р18 (швидкорізальна сталь), для всіх досліджених марок сталей. Різниця в ефективності особливо помітна для сталі 40Х при використанні великого абразиву (зменшення зносу у 11,67 разів для ВК8 проти 3,01 раза для Р18).

Після тертя зразки з ЕП проявляють характерні ознаки абразивного зношування: поверхня зміцнених ЕП сталей має виражену зону тертя, борозни, але кількість та глибина подряпин значно менші, ніж у зразків без покриття. Як у зразках без покриття, так і з покриттями реєструється наявність мережі мікротріщин, з яких починається розвиток та ріст кратерів від деформації абразивними частками.

Проаналізуємо мікроструктуру поверхонь сталей з ЕП ВК8 до та після тертя в абразиві зернистістю 500 мкм.

Поверхня сталь 45 з ЕП ВК8 до тертя характеризується острівковим розташуванням покриття з різною товщиною локальних шарів (від ~ 40 мкм до кількох мкм) (рис. 4.6).

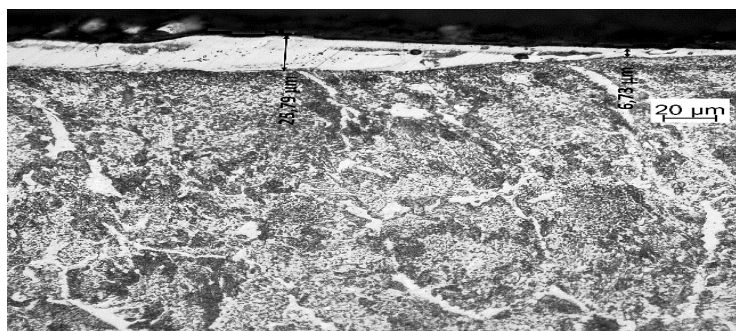


Рис. 4.6. Фрагменти мікроструктури сталі 45 з нанесеним покриттям ВК-8 в вихідному стані (поперечний переріз).

Зображення показує неоднорідну структуру з чіткою межею між покриттям і основним металом.

Поверхня ЕП на сталі 45 після тертя (рис. 4.7) характеризується вираженою зоною тертя та борознами, що вказує на переважання механізмів мікрорізання та адгезійного зносу. На окремих ділянках спостерігається розтріскування і відшарування на межі покриття-основа, що свідчить про слабкий адгезійний зв'язок (рис. 4.7, г).

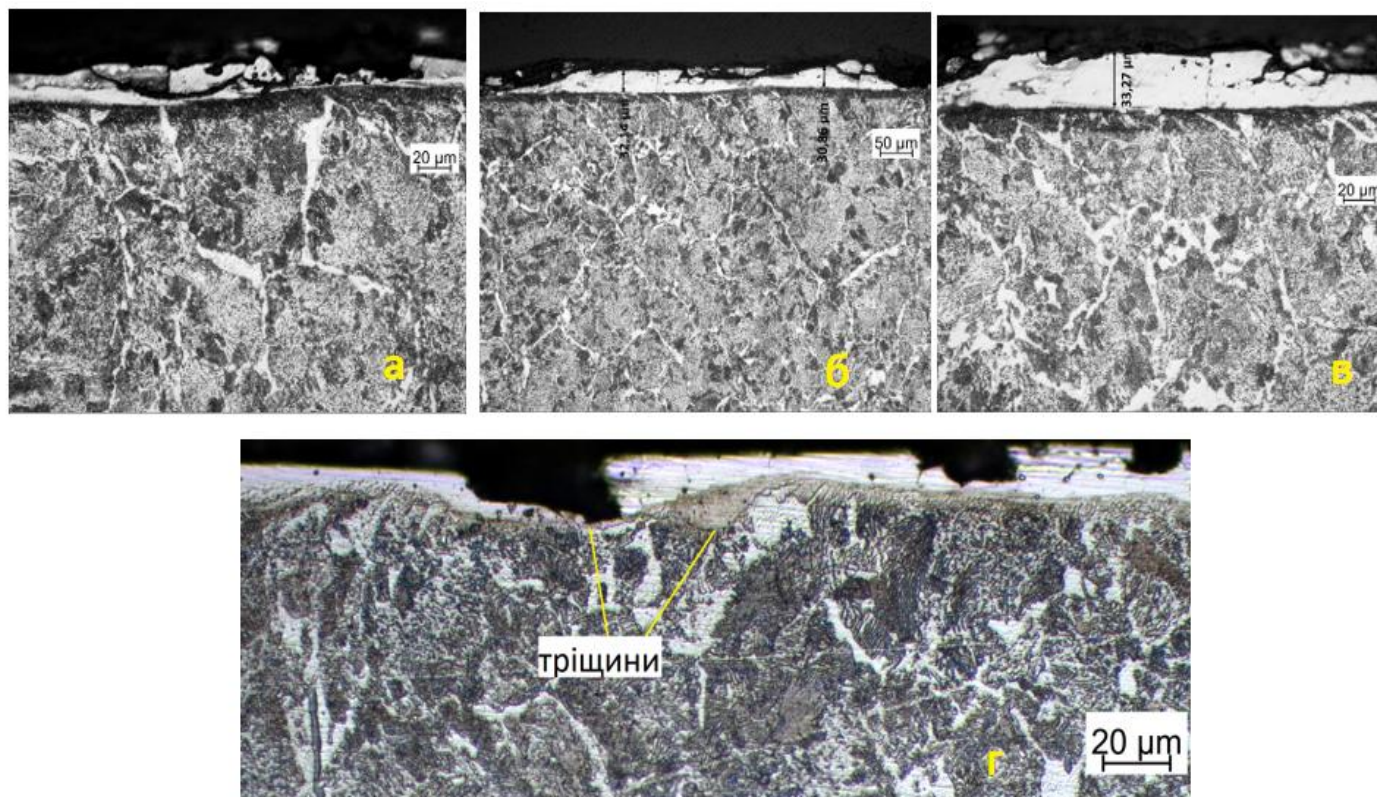


Рис. 4.7. Фрагменти мікроструктури ЕП ВК8 на сталі 45 після тертя в абразиві зернистістю 500 мкм.

Мікроструктура ЕП ВК-8 на сталі 30ХГСА до тертя характеризується наявністю ділянок як з острівковим, так і з майже суцільним покриттям (рис. 4.8). Острівкове покриття має товщину 25...45 мкм, тоді як суцільне покриття – це дуже тонкий шар (~1-4 мкм).

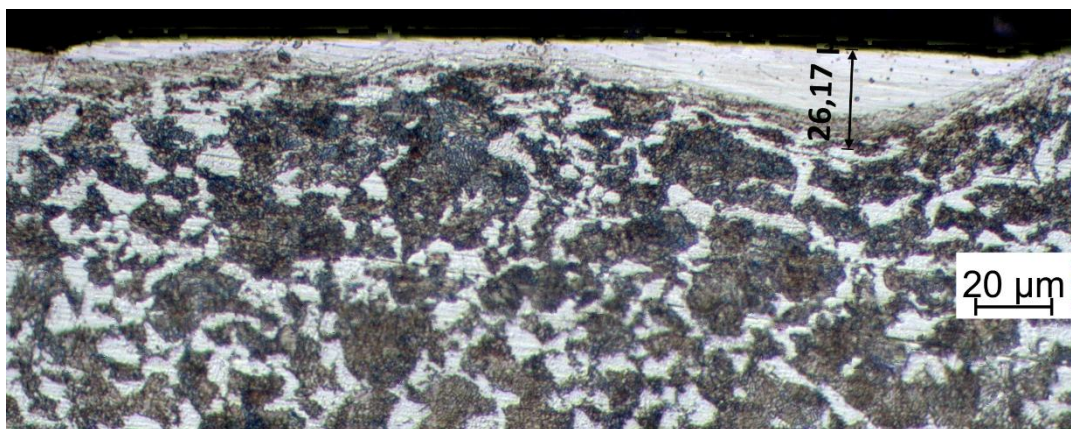


Рис. 4.8. Фрагменти мікроструктури сталі 30ХГСА з нанесеним покриттям ВК-8 в вихідному стані (поперечний переріз).

Аналіз поверхні ЕП після тертя встановив, що покриття не виявляє острівкових ознак, але характеризується значними пошкодженнями у вигляді мікротріщин, сколів і відшарувань, які проявляються по всій товщині ЕП (рис. 4.9, а-в).

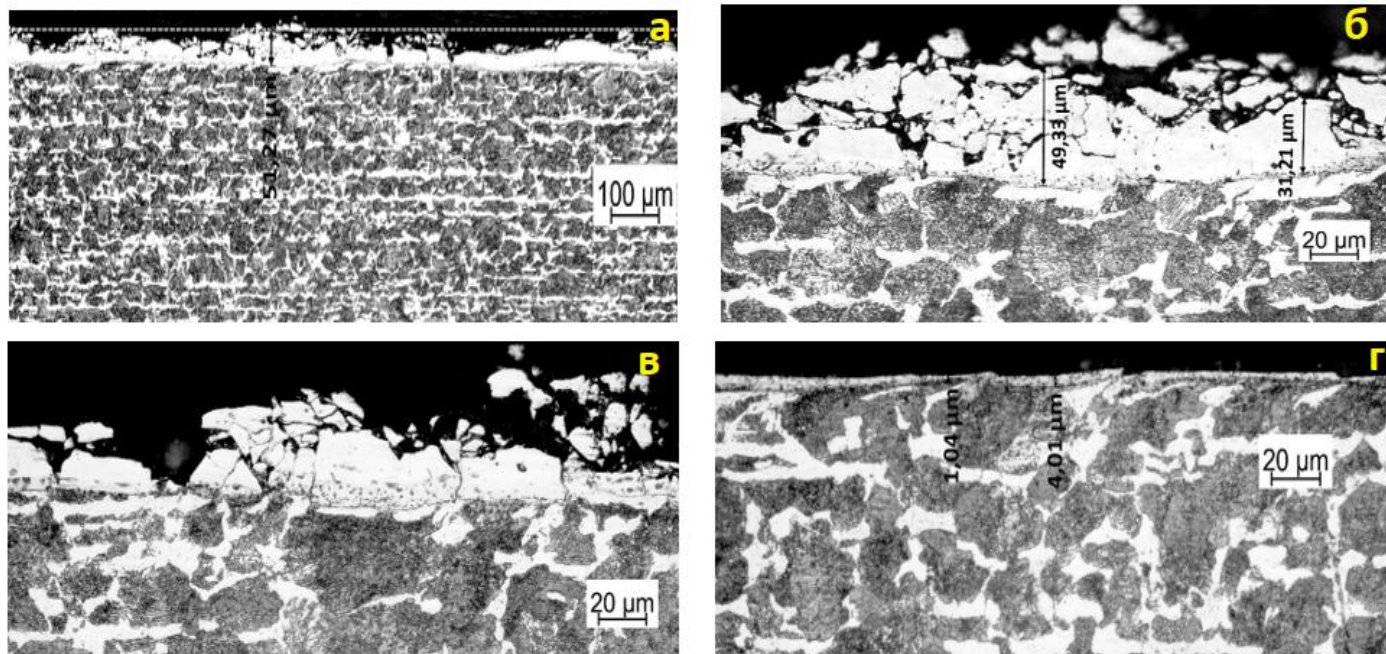


Рис. 4.9. Фрагменти мікроструктури сталі 30ХГСА з ЕП ВК-8 після тертя.

Встановлено, що при терті (зернистість абразиву 500 мкм) не відбувається повне руйнування/розшарування ЕП на межі з основою. На рис. 4.9, г представлено ділянку

зразка, на якій покриття практично суцільне, але залягає дуже тонким шаром без відшарувань і виявляється при значних збільшеннях оскільки має незначну товщину $\sim 1-4$ мкм.

На сталі 40Х в процесі ЕІЛ електродом ВК-8 формується покриття з найбільшою товщиною (30...80 мкм), в порівнянні з ЕІП на сталях 45 та 30ХГСА (рис. 4.10, а-в).

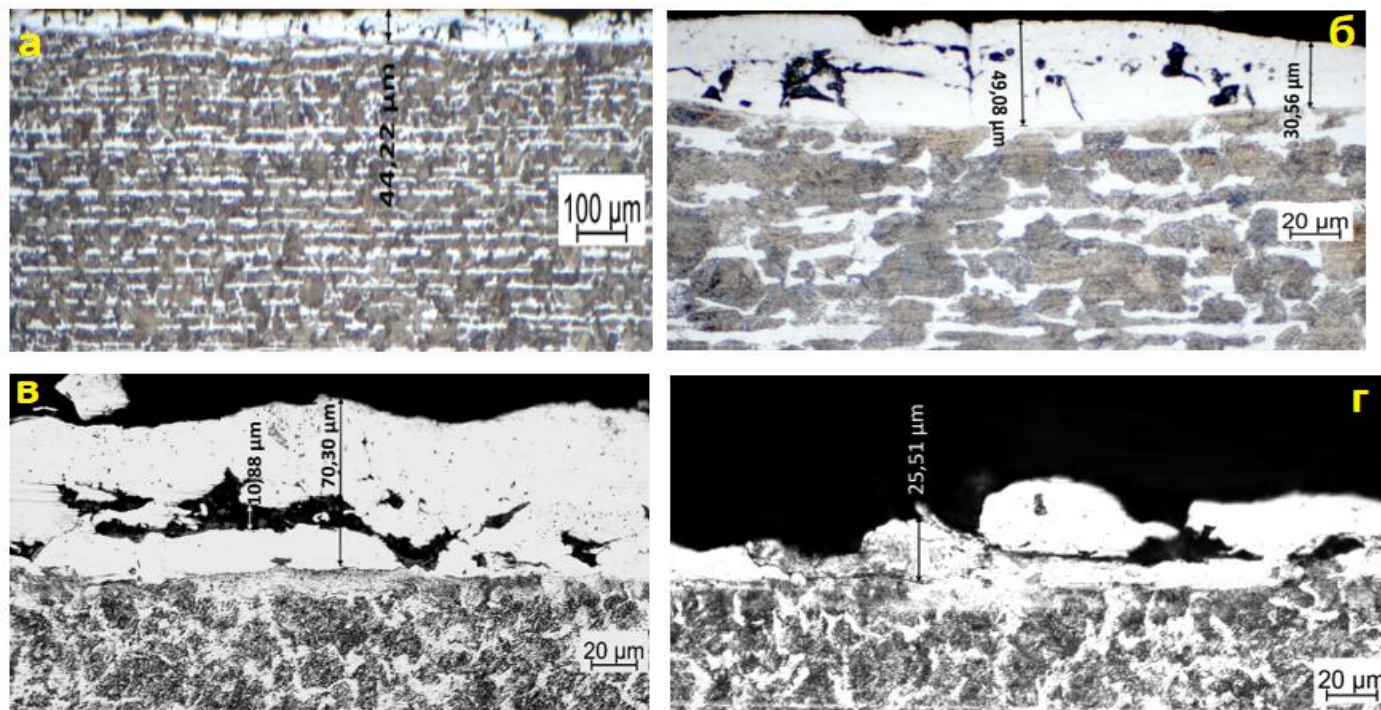


Рис. 4.10. Фрагменти мікроструктури сталі 40Х з ЕІП ВК-8 до (а-в) та після тертя (г) в абразивному середовищі.

Після тертя не встановлено ознак повного руйнування покриття, структура основи та покриття виглядає менш схильною до масштабних відшарувань, переважно спостерігається ЕІП товщиною 10...25 мкм (рис. 4.10, г). Саме для сталі 40Х з ЕІП ВК8 встановлена найбільша абразивна стійкість, в порівнянні з покриттям на інших сталях: зменшення зносу модифікованої ЕІЛ поверхні, в порівнянні з немодифікованою основою, зафіксовано в 4,52 та 11, 67 разів відповідно при терті в абразиві 250 та 500 мкм.

Проведений мікроструктурний аналіз підтверджує, що процес тертя в абразиві спричинює інтенсифікацію деформаційних процесів абразивними частками, що призводить утворення мікротріщин, руйнування та відшарування ЕП. Однак, ступінь пошкодження покриття залежить як від зернистості абразиву, так і від матеріалу основи.

Розглянемо розподіл мікротвердості по глибині ЕП-основа, що є ключовою характеристикою електроіскрових покриттів, яка безпосередньо впливає на їхню зносостійкість (рис. 4.10, 4.11).

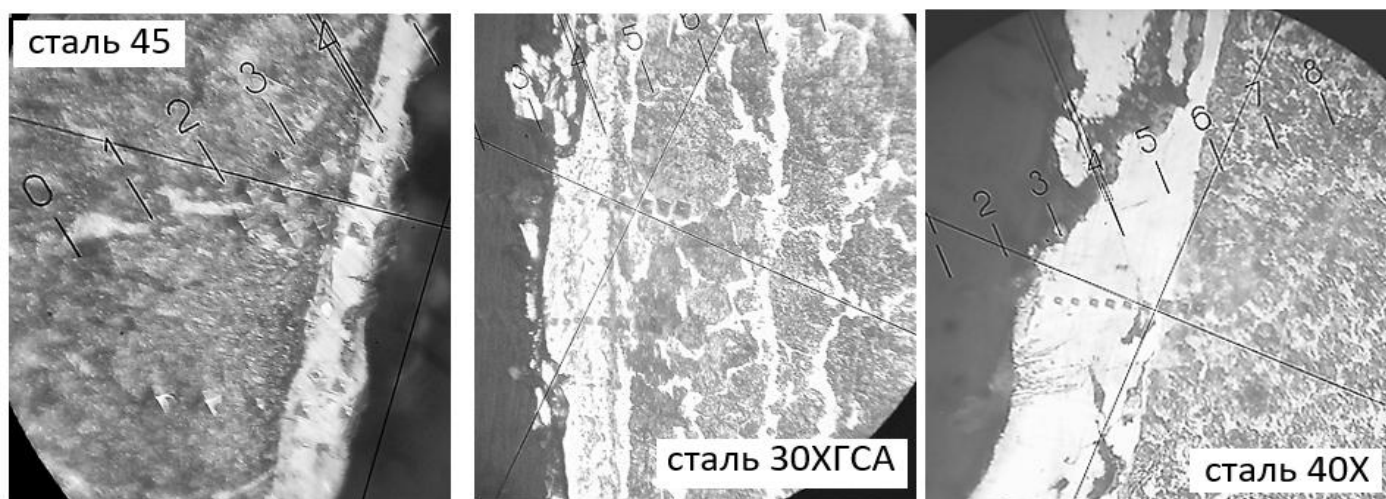


Рис. 4.10. Відбитки індентора при вимірюванні мікротвердості покриття-основа.

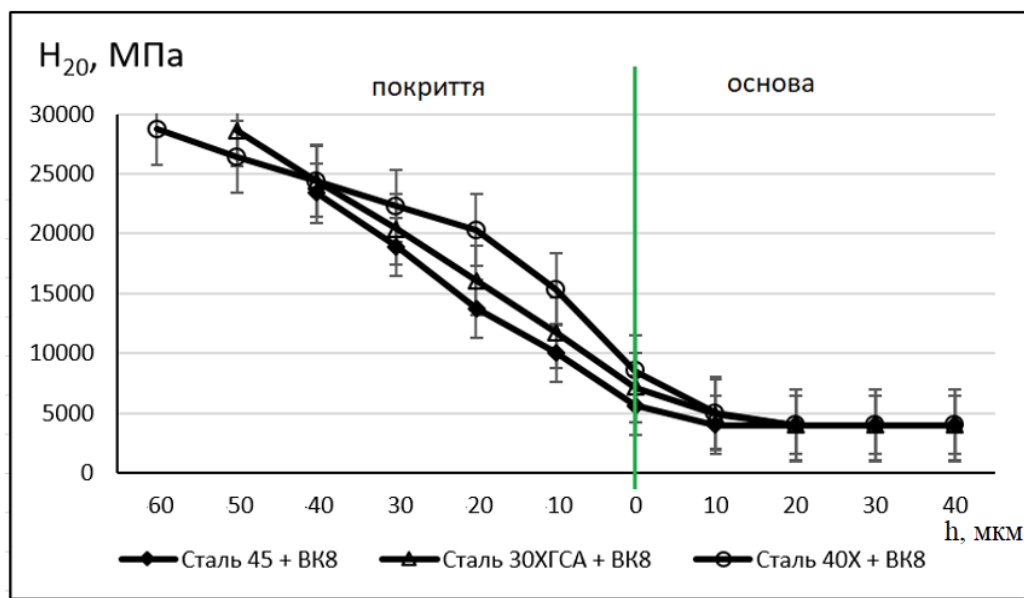


Рис. 4.11. Розподіл мікротвердості по глибині ЕП ВК8 – основа.

Встановлено градієнтний розподіл мікротвердості по глибині покриття-основа, який характеризується наявністю чітко виражених трьох ділянок. Перша – це поверхнева зона покриття, глибина якої становить 60...10 мкм для сталі 40Х та 40...10 мкм для сталей 45 та 30ХГСА. В цій зоні спостерігається максимальні показники мікротвердості. Це обумовлено формуванням білого шару, насиченого карбідами вольфраму (WC) та продуктами їх взаємодії з елементами основи. Найвищі значення зафіксовані на поверхні сталі 40Х + ВК8, де мікротвердість становить 28700 МПа. До другої ділянки слід віднести перехідну зону (лінія «0» на графіку), яка відповідає межі розділу фаз ЕП-основа та для якої спостерігається стрімке зниження мікротвердості. В цій зоні мікротвердість вища за вихідну мікротвердість основи (в межах 6000....9000 МПа), що свідчить про наявність зони термічного впливу та дифузійне насичення підкладки легуючими елементами. Третя ділянка відповідає зоні основного металу (від 10 мкм вглиб основи на графіку рис. 4.11), де мікротвердість стабілізується на рівні вихідних значень конструкційних сталей 4000 МПа (сталь 45) та 4500 МПа (сталь 40Х та 30ХГСА).

Зазначимо, що для сталі 40Х з ЕП ВК8 встановлено найбільш пологий спад мікротвердості по глибині та найвищі абсолютні значення на поверхні. Саме ця марка сталі після ЕП ВК8 проявляє найбільшу зносостійкість в абразивному середовищі.

4.2. Вибір зносостійких композиційних електроіскрових покриттів за комплексними показниками зносостійкості, мікротвердості, морфологічних характеристик покриттів.

В цьому розділі представлені результати абразивного зношування композиційних електроіскрових покриттів, сформованих на сталі 45 з електродів твердих металокерамічних сплавів ВК15, Т15К6 та порошкового дроту Fe-Cr-B (табл. 4.3). Порошковий дріт на основі базового сплаву Fe-15Cr-4B (мас.%) містить 17–20 об.% частинок $(Cr,Fe)_2B$ еліпсоїдальної морфології у феритній матриці.

Хімічний склад порошкового дроту

Марка дроту	Хімічний склад, %			
	C	Cr	B	Fe
Fe-Cr- B	>1	≈14-16	≈4,0	основа

Сплави на основі Fe–Cr–B – це композиційні матеріали з металевою матрицею, які зазвичай складаються з твердого розчину на основі Fe, армованого боридами заліза та хрому (M_2B , де $M=Fe, Cr$), які є основними фазами, що підвищують міцність цих сплавів [139]. Введення Cr дозволяє зменшити крихкість боридів, несуттєво знижуючи мікротвердість структурних складових, що значно підвищує їх коефіцієнт тріщиностійкості. [140]. Кількість, морфологія та розподіл боридів у матриці Fe–Cr суттєво впливають на твердість та зносостійкість [141], при цьому залізна матриця повинна мати достатню в'язкість та міцність для підтримки твердих фаз. Зносостійкість сплаву визначається мікромеханічними характеристиками твердої фази.

ЕІЛ проводилось при постійному струмі 1А, час нанесення – 10 та 20 хвилин, що відповідає середньому питомому часу обробки ($t_{сер}$) сталевого зразку розміром 3.0х3.0 см 1 та 2 хв/см². Абразивну стійкість ЕІП визначали в середовищі SiO₂ зернистість 250 мкм.

Результати вагового зносу залежно від $t_{сер}$ та тривалості випробування представлені в табл. 4.4.

Для сталі 45 без покриття встановлено високий ступінь абразивного зношування, при збільшенні тривалості випробування від 10 до 20 хвилин ваговий знос зростає вдвічі і становить 0.0110 г.

ЕІЛ значно підвищує зносостійкість сталі 45 шляхом формування твердих зміцнених шарів з матеріалів електродів BK15, T15K6. Встановлено, що матеріали з високим вмістом карбідів вольфраму та карбідів титану (85% WC в вольфрамо-кобальтовому сплаві BK15; 79% WC та 15% TiC в титано-вольфрамо-кобальтовому

сплаві T15K6) мають суттєво кращі показники зносостійкості, ніж покриття на залізній основі Fe-Cr-B з домінуванням в структурі зміцнюючих боридів $(Cr,Fe)_2B$ та карбоборидів типу $M_7(C,B)_3$ та $M_{23}(C,B)_6$.

Таблиця 4.4

Результати випробування ЕІЛ покриттів на зносостійкість

Основа	Електрод	Час, хв		Ваговий знос, г
		Питомий час обробки основи, хв/см ²	Тривалість випробування на знос в абразивному середовищі, хв	
Сталь 45	-	-	10	0,0056
Сталь 45	-	-	20	0,0110
Сталь 45	BK15	1	10	0.0017
Сталь 45	BK15	1	20	0,0081
Сталь 45	BK15	2	10	0,0013
Сталь 45	BK15	2	20	0.0049
Сталь 45	T15K6	1	10	0.0054
Сталь 45	T15K6	1	20	0,0081
Сталь 45	T15K6	2	10	0.0050
Сталь 45	T15K6	2	20	0,0060
Сталь 45	Fe-Cr-B	1	10	0,0080
Сталь 45	Fe-Cr-B	1	20	0,0175
Сталь 45	Fe-Cr-B	2	10	0,0168
Сталь 45	Fe-Cr-B	2	20	0,0410

Збільшення питомого часу обробки основи з 1 до 2 хв/см² призводить до формування товстішого і, як наслідок, більш стійкого шару для покриттів BK15 та T15K6. Для зазначених типів покриттів спостерігається зменшення вагового зносу при збільшенні часу нанесення покриття. Наприклад, для BK15 при 10 хв випробування знос зменшується з 0.0017 г (1 хв/см²) до 0.0013 г (2 хв/см²).

Для покриття Fe-Cr-B не встановлено підвищення зносостійкості, в порівнянні з сталлю без покриття: режим нанесення ЕІП 1 хв/см² дає знос 0.0175 г (при 20 хвилини випробування), що гірше за основу. Збільшення часу обробки до 2 хв/см² призвело до аномально високого зносу покриття (знос зростає в 2...2,3 рази), що може вказувати на руйнування крихкого шару.

Порівняльна характеристика досліджуваних ЕП свідчить про таку послідовність ефективності покриттів (від кращого до гіршого) ВК15 > Т15К6 > Сталь 45 (без покриття) > Fe-Cr-B (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Порівняльна характеристика ефективності ЕП при абразивному зношуванні

Матеріал	Час обробки, хв/см ²	Ваговий знос (тривалість випробувань 20 хв), г	Зменшення зносу відносно сталі 45
Сталь 45 без покриття	-	0.0110	1
Сталь 45 + ВК15	2	0.0049	2.25
Сталь 45 + Т15К6	2	0.0060	1.83
Сталь 45 + Fe-Cr-B	2	0.0410	0,27 (гірше основи)

Склад зносостійких сплавів для ЕП є вирішальними у визначенні їхньої твердості, в'язкості, тертя та стійкості до зносу. Використовуючи ЕП можна адаптувати властивості сплаву до вимог конкретного застосування.

Оцінка мікротвердості ЕП (табл. 4.6, 4.7) є одним із етапів дослідження їхньої якості, особливо коли мова йде про роботу деталей в умовах абразивного зношування.

Таблиця 4.6

Мікротвердість поверхневих шарів сталі 45 та ЕП в вихідному стані

Основа	Електрод	Мікротвердість поверхневих шарів до тертя, Н ₁₀₀ , МПа		
		Питомий час обробки основи, хв/см ²		
		0	1	2
Сталь 45	-	4855	-	-
Сталь 45	ВК15	-	12454	25184
Сталь 45	Т15К6	-	10179	13203
Сталь 45	Fe-Cr-B	-	8580	8698

Мікротвердість поверхневих шарів сталі 45 та ЕП після тертя

Основа	Електрод	Мікротвердість поверхневих шарів після тертя (тривалість випробування на знос в абразивному середовищі 10 хв), H_{100} , МПа		
		Питомий час обробки основи, хв/см ²		
		0	1	2
Сталь 45	-	3430	-	-
Сталь 45	BK15	-	4875	8240
Сталь 45	T15K6	-	8110	8407
Сталь 45	Fe-Cr-B	-	3813	3830

Згідно з класичною теорією тертя та зношування, опір матеріалу абразивному впливу прямо пропорційний його твердості. Абразивні частки діють як мікрорізиці, тому чим вища мікротвердість покриття, порівняно з твердістю абразиву, тим менша глибина впровадження («царапання») цих часток у поверхню. Для ефективного опору мікротвердість покриття (H_n) повинна перевищувати твердість абразиву ($H_{абр}$) у співвідношенні $H_n/H_{абр} > 0.6 \dots 0.8$.

Всі досліджувані ЕП відповідають цьому співвідношенню в вихідному стані (в якості абразиву використано оксид кремнію), для ЕП BK15 цей показник найвищий і знаходиться на рівні 1,92 (рис. 4.12).

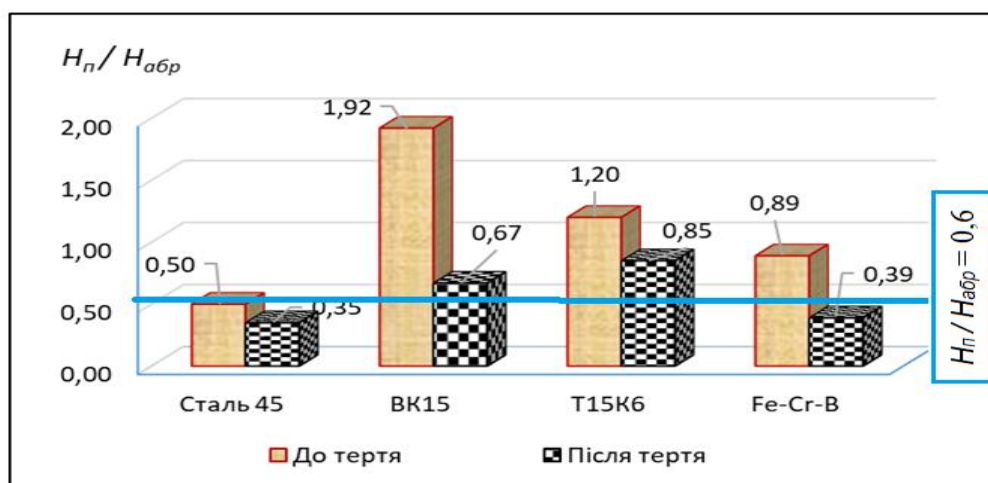


Рис. 4.12. Порівняльна оцінка мікротвердості покриття з твердістю абразиву до та після тертя (питомий час обробки основи при нанесенні ЕП становив 2 хв/см²).

Однак, після тертя співвідношення $H_{\text{п}}/H_{\text{абр}}$ суттєво зменшується і для ЕП ВК15, Т15К6 та Fe-Cr-B (питомий час обробки основи при нанесенні ЕП – 2 хв/см²) становить відповідно 0.67, 0.85 та 0.39.

Розглянемо закономірності зміни мікротвердості поверхневих шарів ЕП після тертя.

Мікротвердість вихідної поверхні сталі 45 до тертя складає 4855 МПа, після тертя вона знижується до 3430 МПа, що свідчить про знеміцнення поверхневих шарів металу. Мікроструктура поверхні після тертя (рис. 4.13) характеризується наявністю глибоких прямолінійних борозен, орієнтованих у напрямку руху абразиву. Це підтверджує домінування механізму мікрорізання та пластичної деформації матеріалу м'якої основи твердими частками абразиву.

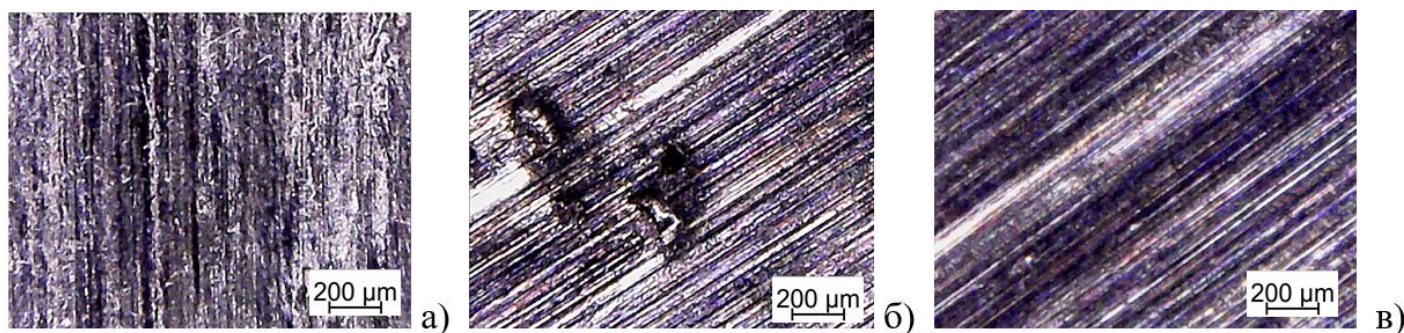


Рис. 4.13. Поверхня сталі 45 без покриття до (а) та після тертя (б, в).

ВК15 формує найбільш твердий шар (12454 та 25184 МПа при питомому часу обробки основи 1 та 2 хв/см² відповідно) і демонструє найкращу стійкість до абразивного зношування, що пояснюється високою в'язкістю кобальтової матриці, яка утримує надтверді зерна карбіду вольфраму та запобігає викришуванню частинок.

Для ЕП ВК15 сліди на поверхні після абразивного зношування виражені значно менше, спостерігається дискретна структура (рис. 4.14). Дане ЕП проявляє мінімальну деградацію поверхні порівняно з іншими матеріалами. Абразивні частки, ймовірно, ковзають по поверхні надтвердих зерен карбіду вольфраму, які виступають над

матрицею. Це суттєво змінює механізм зносу, який відповідає поверхневому стиранню ЕП, а не різанню, що забезпечує високу стійкість покриття.

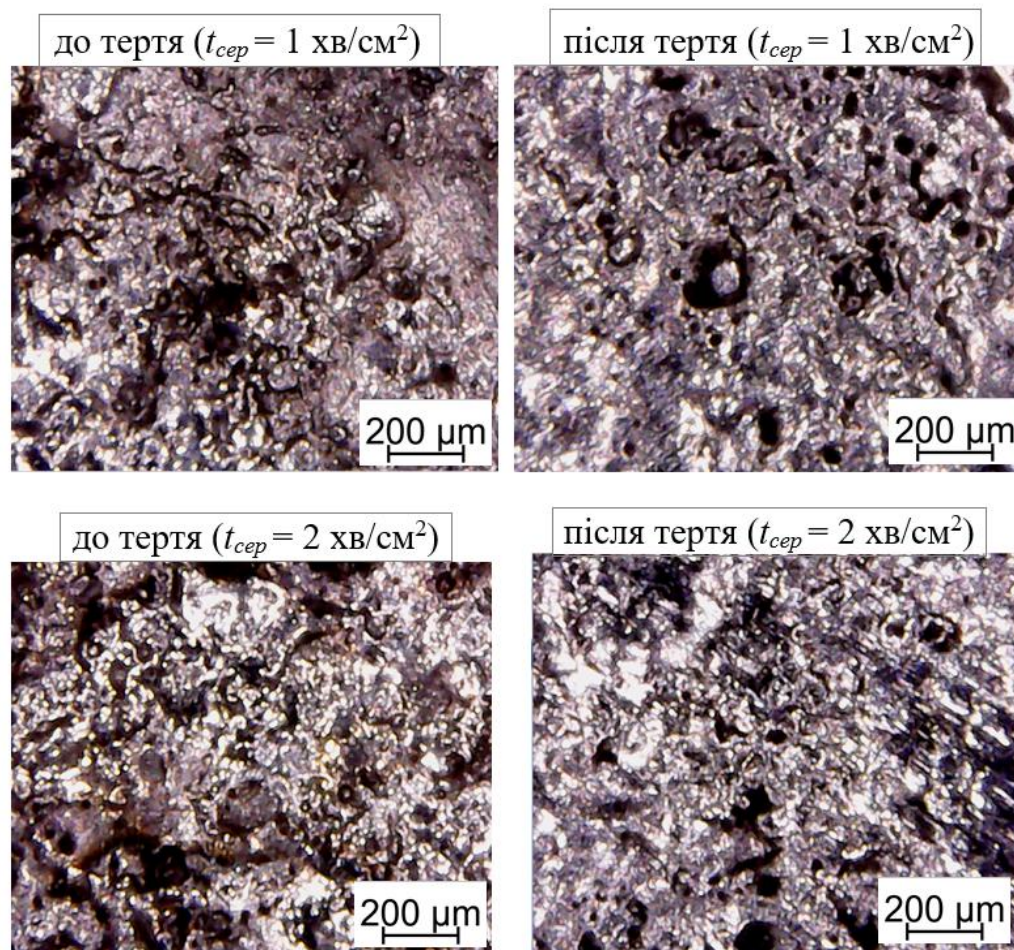


Рис. 4.14. Мікроструктура ЕП ВК15 до та після тертя (питомий час обробки основи при нанесенні ЕП ($t_{сер}$) 1 та 2 хв/см²).

Незважаючи на те, що мікротвердість ЕП Т15К6 після тертя перевищує (для $t_{сер}$ 1 хв/см²) або аналогічна (для $t_{сер}$ 2 хв/см²) ЕП ВК15, співвідношення $H_{п}/H_{абр}$ після тертя 0.85, що найбільше серед всіх досліджуваних матеріалів, зносостійкість даного ЕП менше, ніж для ВК15. Це пов'язано з більшою крихкістю титановмісних карбідів у абразивному середовищі.

До особливостей мікроструктури ЕП Т15К6 після зношування можна віднести: сліди тертя з направленою текстурою в напрямку руху абразивних часток помітні лише

для більш тонкого покриття з середнім часом обробки поверхні 1 хв/см², нанесення ЕП більшої товщини забезпечує підвищення стійкості покриття (рис. 4.15).

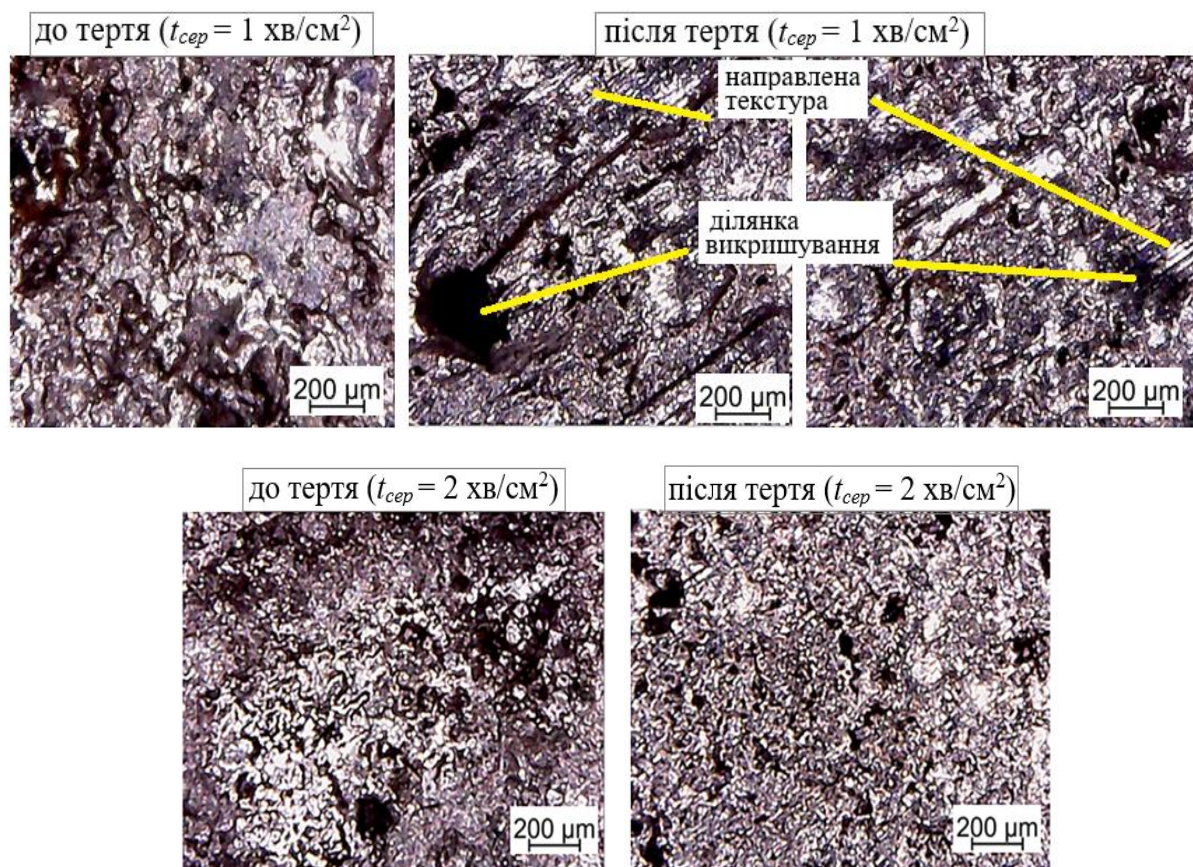


Рис. 4.15. Мікроструктура ЕП Т15К6 до та після тертя.

Після тертя наявні локальні ділянки згладжування (полірування) поверхні, що свідчить про стійкість до мікрорізання. Іноді спостерігаються невеликі ділянки локального викришування або сколів, що обумовлено нижчою в'язкістю цього покриття, порівняно з ВК15.

Розглянемо причини низької зносостійкості ЕП Fe-Cr-V в абразивному середовищі, де частки SiO₂ легко руйнують феритну матрицю, попри наявність боридів.

Порошковий дріт при ЕП дає специфічні дефекти, які, перш за все проявляються в морфологічній неоднорідності ЕП, зокрема наявна розгалужена відкрита пористість (рис. 4.16, поверхні до тертя).

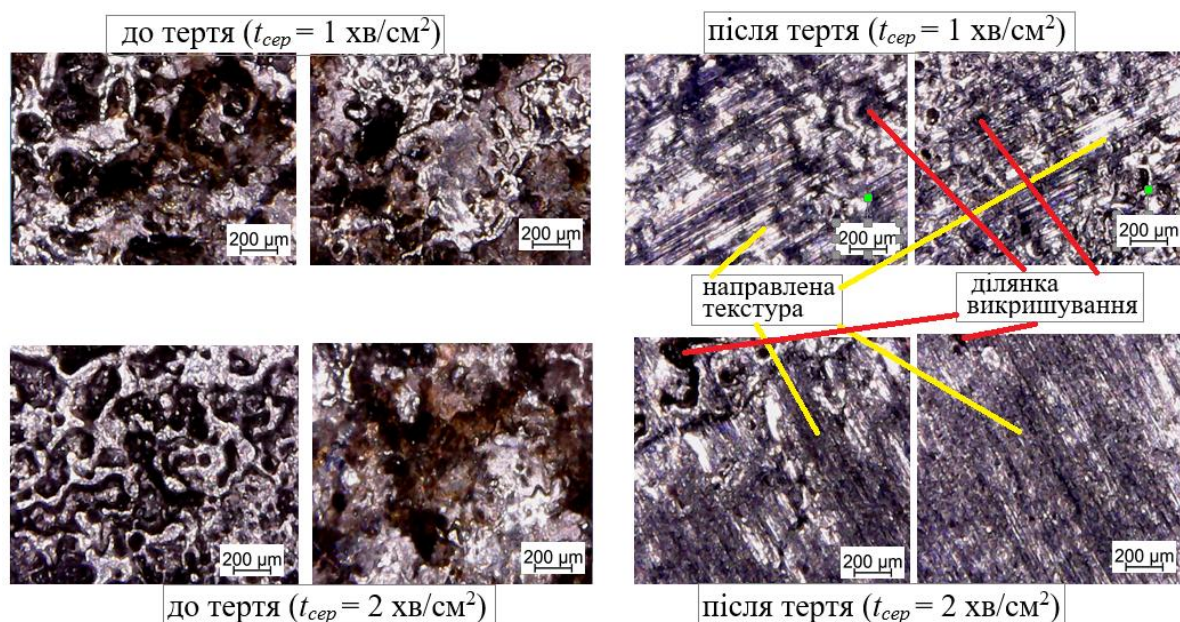


Рис. 4.16. Морфологічні характеристики ЕІП Fe-Cr-B.

При ЕІЛ порошковим дротом на основі базового сплаву Fe-Cr-B з 1% С, 15% Cr та 4% В майже весь хром і вуглець ідуть на формування боридів та карбідів, при цьому основу матриці становить майже чисте залізо, яке не чинить опору абразивним часткам. Бориди хрому та заліза М2В дуже тверді, але надзвичайно крихкі. Під час абразивного зношування за схемою «пісок-гумовий ролик» піщинки кварцу створюють зосереджене навантаження. Замість того, щоб поступово стиратися, еліпсоїдальні бориди розколюються. Оскільки вони займають 17–20% об'єму, їхнє руйнування залишає в покритті великі «кратери» (рис. 4.16, поверхні після тертя). Абразив потрапляє в ці кратери і починає руйнувати м'яку феритну матрицю зсередини, що призводить до катастрофічного підвищення інтенсивності зношування ЕІП.

Еліпсоїдальні частинки $(\text{Cr,Fe})_2\text{B}$, які вибиваються з матриці абразивними частками, самі стають абразивом з більшою твердістю, ніж твердість SiO_2 , що додатково підвищує знос ЕІП. Також зазначимо, що еліпсоїдальна форма боридів у поєднанні з м'якою матрицею, яка зазвичай вважається перевагою, в умовах впливу абразивного середовища дає негативний ефект і спричинює інтенсивне зношування покриття, тому

що округлу частинку легше вибити з матриці, ніж частинку дендритної форми, яка міцніше утримується в матриці.

На мікрофотографіях видно значне руйнування структури, схоже на відтиснення та масивне викришування значних фрагментів зміцненого шару (рис. 4.16, поверхні після тертя).

На основі одержаних експериментальних даних можна зробити висновок, що композиційне ЕП на основі порошкового дроту Fe-Cr-B не рекомендовано для використання в умовах абразивного зношування. Аналіз літературних джерел [142-145] визначив напрямки, які можуть бути направлені на підвищення зносостійкості такого типу покриття шляхом модифікації фазової структури порошкового дроту (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Напрямки підвищення зносостійкості покриттів системи Fe-Cr-B-C

Проблема	Шляхи реалізації	Очікуваний результат
М'яка матриця	Легування Mn, Ni або Mo	Зміцнення матриці для утримання боридів
Викришування частинок (Cr,Fe) ₂ B еліпсоїдної форми	Модифікування Ti/Nb або зміна режиму ЕП	Формування армуючих часток дендритної форми, які міцно будуть закріплені в металевій матриці
Крихкість боридів	Зменшення вмісту B до 2-2.5%	Зниження частки боридної фази на користь міцнішої матриці.

Таким чином, на основі одержаних експериментальних результатів оцінки абразивної стійкості ЕП можна робити вибір композиційних ЕП відповідно до вимог конкретного застосування на основі комплексного оцінювання зносостійкості, морфології та фазового складу, що дозволяє перейти від емпіричного «нанесення шару» до проектування поверхонь із заданими властивостями.

Висновки до розділу 4.

1. Встановлено залежність інтенсивності зношування сталей 45, 40Х та 30ХГСА від розміру абразивних частинок – збільшення максимального розміру абразиву (SiO_2) вдвічі (з 250 мкм до 500 мкм) призводить до зростання зносу в 5.47, 5.0 та 3.6 разів відповідно. Механізм руйнування при цьому змінюється від втомного зношування (абразив 250 мкм) до глибокого дряпання та мікрорізання (абразив 500 мкм).

2. Доведено, що абразивна стійкість сталей в нормалізованому стані корелює з розміром зерна та наявністю легуючих елементів: сталь 30ХГСА з найменшим розміром зерна (~15–20 мкм) та сорбітоподібним перлітом виявилася стійкішою до великодисперсних частинок (500 мкм). Найбільш схильна до зносу сталь 45 з найбільшим розміром зерен (~40 мкм), де домінує механізм «викришування» та розвиток сітки мікротріщин розміром від 10 до 35 мкм.

3. Нанесення електроіскрових покриттів твердими сплавами ВК8 та Р18 змінює процес зношування, підвищуючи абразивну стійкість модифікованої ЕІЛ основи. Найвищу ефективність показало покриття ВК8 на сталі 40Х, де зменшення зносу модифікованої поверхні зафіксовано в 11,67 разів при терті в абразиві 500 мкм.

4. Для покриттів зі швидкорізальної сталі Р18 встановлено схильність до прискореного викришування при терті дрібним абразивом (250 мкм), що пояснюється дискретним характером покриття (висота до 30–33 мкм) та наявністю мікрорельєфу з кратерами, у яких дрібні абразивні частинки можуть фіксуватися, підвищуючи ефективність різального впливу.

5. Покриття на основі карбіду вольфраму ВК8 формує найбільш твердий шар (25184 МПа при питомому часі обробки 2 хв/см²) і демонструє найкращу стійкість в абразивному середовищі. Висока в'язкість кобальтової матриці ВК8 ефективно утримує надтверді зерна WC, змінюючи механізм зносу з різання на поверхневе стирання, що забезпечує мінімальну деградацію поверхні.

6. Встановлено, що ЕІЛ сплаву ВК8 на сталях сприяє формуванню градієнтного розподілу мікротвердості по глибині ЕІП-основа з трьома чітко вираженими ділянками:

поверхнева зона (60-10 мкм) з максимальною твердістю (до 28700 МПа), перехідна зона з різким зниженням твердості (6000–9000 МПа) та зона основного металу (~4000 МПа). Для ЕП ВК8 на сталі 40Х встановлено найбільш пологий спад мікротвердості по глибині та найвищі абсолютні значення на поверхні, що спричинює найбільшу зносостійкість в абразивному середовищі.

7. Для покриття Fe-Cr-V на сталі 45 зафіксовано низьку зносостійкість (знос більше, ніж для основи) – знос зростає в 2–2,3 рази при збільшенні часу обробки до 2 хв/см². Це пов'язано з формуванням крихких еліпсоїдальних боридів (Cr,Fe)₂V (17–20 об.%) у м'якій феритній матриці. Низька зносостійкість покриття Fe-Cr-V пояснюється механізмом викришування: піщинки кварцу розколюють крихкі еліпсоїдальні бориди, залишаючи великі «кратери». Абразив потрапляє в ці кратери і руйнує м'яку феритну матрицю зсередини. Вибиті бориди, твердість яких більша за SiO₂, стають додатковим абразивом.

8. Проаналізовано, що для забезпечення ефективного опору абразивному зношуванню мікротвердість покриття повинна перевищувати твердість абразиву у співвідношенні 0.6...0.8. Після тертя для покриття Fe-Cr-V це співвідношення знижується до критичного значення 0.39, що підтверджує його непридатність для умов експлуатації в абразивному середовищі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Визначено ключові фактори абразивного зношування вузлів тертя авіаційної та наземної техніки, зокрема залежність інтенсивності зносу від концентрації, розміру та твердості абразивних частинок, навантаження, кінематичних параметрів контакту та наявності мастильного матеріалу. Проаналізовано основні види пошкоджень деталей шасі (штки амортизаційних стійок, золотникові пари, підшипники кочення) та наземної техніки (деталі двигунів, трансмісії, гідроприводів).

2. Обґрунтовано перспективність застосування методу електроіскрового легування як високоефективної, екологічно чистої та низьковитратної технології для зміцнення та відновлення зношених деталей, що забезпечує високу адгезію покриттів без суттєвого нагрівання основного матеріалу. Цей метод дозволяє формувати зносостійкі та корозійностійкі покриття, зберігаючи структурну цілісність основи. Вивчення загальних закономірностей і мікромеханічних властивостей сформованого шару при ЕІЛ та їх вплив на механізм і кінетику зношування дозволяє визначити шляхи для управління експлуатаційними властивостями модифікованих поверхонь і удосконалювати технологію формування електроіскрових зносостійких покриттів.

3. Встановлено залежність інтенсивності зношування сталей 45, 40Х та 30ХГСА від розміру абразивних частинок – збільшення максимального розміру абразиву (SiO_2) вдвічі (з 250 мкм до 500 мкм) призводить до зростання зносу в 5.47, 5.0 та 3.6 разів відповідно. Механізм руйнування при цьому змінюється від втомного зношування (абразив 250 мкм) до глибокого дряпання та мікрорізання (абразив 500 мкм). Доведено, що абразивна стійкість сталей в нормалізованому стані корелює з розміром зерна та наявністю легуючих елементів: сталь 30ХГСА з найменшим розміром зерна (~15–20 мкм) та сорбітоподібним перлітом виявилася стійкішою до великодисперсних частинок (500 мкм).

4. Експериментально встановлено, що електроіскрове легування значно підвищує зносостійкість конструкційних сталей (сталь 30, 45 та 30ХГСА) в абразивному

середовищі, що обумовлено формуванням на поверхні зміцненого шару з новою фазовою структурою. Визначено, що відносна зносостійкість 2,3...3 досягається при використанні сплавів Т15К6, ВК8, сталі Р18. З'ясовано механізм підвищення зносостійкості покриттів із твердих сплавів ВК8 та Т15К6, який полягає у створенні гетерогенної структури, що поєднує надтверді армуючі фази (карбіди WС та TiС) із в'язкою кобальтовою матрицею, що запобігає крихкому сколюванню.

5. ЕІЛ сплаву ВК8 на сталях сприяє формуванню градієнтного розподілу мікротвердості по глибині ЕІП-основа, що має три чітко виражені ділянки: поверхнева зона з максимальною твердістю (до 28700 МПа), перехідна зона з різким зниженням твердості (6000–9000 МПа) та зона основного металу (~4000 МПа). Така закономірність забезпечує плавний перехід властивостей і запобігає відшаруванню покриття під час абразивного впливу. Встановлено, що покриття на основі карбіду вольфраму ВК8 формує найбільш твердий шар та демонструє найкращу абразивну стійкість, змінюючи механізм зносу з різання на поверхневе стирання завдяки високій в'язкості кобальтової матриці, яка утримує тверді зерна WС.

6. Підвищення зносостійкості сталей з ЕІП зі сталі Р18 (на 24% для сталі 30ХГСА та на 50% для сталі 45) порівняно з покриттями зі сталі У10 пояснюється наявністю в покритті значної кількості складних карбідів вольфраму $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ (Me_6C) та карбідоутворюючих елементів V та Mo. Підвищення опору зношуванню в абразивному середовищі ЕІП зі сталі Р18 обумовлено наявністю карбідів та карбідоутворюючих елементів загальною кількістю до 28%.

7. Доведено, що крихке руйнування є домінуючим механізмом зношування для покриттів із високовуглецевої сталі У10 та кераміки ЦЛАБ-1, що обумовлено для ЕІП сталі У10 наявністю карбіду заліза до 16% в структурі сталі та наявністю крихкої боридної складової ZrB_2 у ЦЛАБ-1. Для покриття Fe-Cr-B низька абразивна стійкість спричинена формуванням крихких еліпсоїдальних боридів $(\text{Cr,Fe})_2\text{B}$ (17–20 об.%) у м'якій феритній матриці при ЕІЛ основи.

8. Обґрунтовано, що для ефективного опору абразивному зношуванню мікротвердість покриття має перевищувати твердість абразиву у співвідношенні 0.6...0.8 (для ЕІП зі сплавів ВК15 та Т15К6). Критичне зниження цього співвідношення (наприклад, до 0.39 для покриття Fe-Cr-B) свідчить про його непридатність для роботи в абразивному середовищі, оскільки відбувається інтенсивне викришування.

9. Проаналізовано з застосуванням математичного апарату динамічні процеси при терті деталей з ЕІП в абразивному середовищі, які характеризуються виникненням автоколивань, що спричиняють додатковий опір та інтенсифікують втомне зношування. Через нестаціонарне тертя у поверхневих шарах виникають деформаційні хвилі та критичні напруження, які призводять до тріщиноутворення та відшарування покриття від основи. Математичне моделювання динамічної нестійкості електроіскрових покриттів дозволило встановити, що параметричний резонанс є головною причиною передчасного руйнування матеріалу при взаємодії з абразивом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скворцов О.О., Мікосянчик О.О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 3 (100). С.64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)
2. Соловйов В. І., Коротін С. М., Коровін І. П. Організація експлуатації бойової авіаційної техніки. Підручник: К., НУОУ, 2016. 216 с.
3. Ігнатович С. Р., Маленко В. Н., Лабунец В.Ф. Ідентифікація поверхневої міцності деталей вузлів трения літальних апаратів. *Проблеми трибології*. 2007. №1. С. 11-14.
4. Беззубець С. В., Сорочан О. О. Аналіз стану та перспектив розвитку системи технічного обслуговування авіації повітряних сил збройних сил України. *Збірник наукових праць кафедри авіації: Інженерно-авіаційне забезпечення*. 2021. № 2(9). С. П-1-10.
5. Костецький Б. И. Поверхнева міцність матеріалів при терті. К.: Техніка, 1976. 246 с.
6. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Педан Є. В., Березівський Н. М. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 2 (99). С.4-13. DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17611
7. Ilin O.A., Mikosianchyk O.O., Yashchuk O. P. et al. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 1/107. P.34-40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-34-40>
8. Arne F., Plante B., Samuels A., Savourey A. Take Care of Your Brakes. Airbus S.A.S. Proprietary document. 2022 URL: <https://safetyfirst.airbus.com/take-care-of-your-brakes/> (дата звернення: 14.09.2023).

9. Awang M., Khalili A.A., Pedapati S.R. A Review: Thin Protective Coating for Wear Protection in High-Temperature Application. *Metals*. 2020. 10. 42 <https://doi.org/10.3390/met10010042>

10. Criou O. A350 XWB family & technologies. Presentation at Hamburg University of Applied Sciences. 2007. URL: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dgllr/hh/text_2007_09_20_A350XWB.pdf (дата звернення: 14.09.2023).

11. Faisal N., Cora Ö. N., Bekci M. L. et al. Defect Types. In: Sause M.G.R., Jasiūnienė E. (eds) Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace. Springer Aerospace Technology. Springer, Cham. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3_3

12. Брусило Ю. В. Підвищення ресурсу авіаційної наземної техніки удосконаленням технології відновлення деталей типу вал : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Нац. авіац. ун-т. Київ, 2015. 20 с.

13. Дмитриченко М. Ф., Фень Є. К., Малишкін В. В., Дмитренко В. Н. Підвищення терміну експлуатації деталей авіаційної техніки за рахунок відновлення та зміцнення їх газотермічними покриттями. *Proceedings of National Aviation University*. 2001. 10(3). С. 35–39. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.10.12101>

14. Мельник О. В. Причини зношування деталей вузлів тертя авіаційної техніки та методи забезпечення їх працездатності. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 1(86). С.87-92. <https://doi.org/10.18372/0370-2197.86.14491>

15. Сафонюк І. Ю. Вплив вмісту води у гідравлічній оливі на знос деталей тертя засобів транспорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. № 159. С. 103-108. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67066>

16. Kutuyinov, V.F., Ionov, A.A. (1996). Specific features of composite-material structural design. In: Zagainov, G.I., Lozino-Lozinsky, G.E. (eds) Composite Materials in Aerospace Design. *Soviet Advanced Composites Technology Series*. 1996. vol 6. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0575-0_1

17. Gautier G., Faga M. G., Tebaldo V. Impact Wear Resistance of Nanocomposite Coatings for Aircraft Components. *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 813. P. 387-392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.813.387>
18. Labunets V. F., Prysiazhniuk V. V., Melnyk O. V. Electric spark alloying of structural alloyed steel 30HGSNA for parts of friction units. *Visnyk of vinnytsia politechnical institute*. 2019. Vol. 146, no. 5. P. 81–84. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-146-5-81-84>
19. Щепетов В. В., Євсюков Є. Ю., Громенко В. Ю. Експлуатаційні можливості покриттів при підвищенні довговічності деталей авіаційної техніки. *Proceedings of the national aviation university*. 2001. Т. 10, № 3. Р.9-12 <https://doi.org/10.18372/2306-1472.10.12091>
20. Хоменко І. М., Кіндрачук М. В., Кобринець А. К. Граничнодопустимий знос машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2010. № 52. С. 28–37.
21. Ashrafizadeh H., McDonald A., Mertiny P. Erosive and Abrasive Wear Resistance of Polyurethane Liners. *From the edited volume Aspects of Polyurethanes*, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68870
22. Ashrafizadeh H., Mertiny P., McDonald A. Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance of polyurethane elastomers. *Wear*. 2016. 368-369. P. 26–38 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.08.008>
23. Rodriguez D., Meyers K. E. Schadensanalyse bei wälzlagern mithilfe der norm ISO 15243. 2022. <https://evolution.skf.com/de/schadensanalyse-bei-waelzlagern-mithilfe-der-norm-iso-15243/#>. (дата звернення: 19.08.2024).
24. Vencel A., Gašić V., Stojanović B. Fault tree analysis of most common rolling bearing tribological failures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 174. 012048 doi:10.1088/1757-899X/174/1/012048
25. Рябков В.И., Капитанова Л.В., Бабенко Ю.В. и др. Особенности использования титановых сплавов, нержавеющей сталей, металлокомпозиционных и антифрикционных

материалов в шасси современных самолетов. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2003. Вип. 1(36). С.6-15.

26. Viunyk O., Didur V., Sieryi I. The results of txperimental studies the effect of eplam coatings on the wear of the gear pump parts. *Scientific bulletin of the tavraia state agrotechnological university*. 2020. Vol. 10. P. 16. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-16>

27. López-Ortega A., Bayón R., Arana J.L., Arredondo A., Igartua A. Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications. *Tribology International*. 2018. Vol. 121. P. 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.049>

28. Закалов О.В. Основы тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.

29. Uvarov V., Bespalov S. Prediction of Tribological Properties of Structural Steels Using Artificial Neural Networks. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2019. Vol.5, No.1. P. 45–60. <https://doi.org/10.23939/ujmeme2019.01.045>

30. Малярчук І., Мікосянчик О. Оцінка триботехнічних властивостей трансмісійної оливи з комплексами мікро- та нанодобавок. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 3 (108). С.59-67. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(108\).20448](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(108).20448)

31. Khimko A., Mikosyanchyk O., Khimko M., Filonenko O. Wear resistance of contact of titanium alloys with composite materials depending on the technology of their manufacturing under conditions of nominally fixed contact. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 3 (108). С.28-37 [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(108\).20445](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(108).20445)

32. Kostyunik R., Mikosianchyk O., Stelmakh A., Kushchev A., Shymchuk S., Zaichuk N. An innovative approach to non-contact cleaning of mini-ball bearings. *Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12(2). P. A10–A19. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).a2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).a2)

33. Al-Quraan T. M. A., Mikosianchyk O., Tokaruk V., Mnatsakanov R. et al. Determination of the criteria for the transition of the tribosystem to disastrous wear. *Jurnal Tribologi*. 2024. 41. P. 93-112. <https://jurnaltribologi.mytribos.org/v41/JT-41-93-112.pdf>
34. Скворцов О. О., Мікосянчик О. О. Залежність зносостійкості електроіскрових покриттів в абразивному середовищі від зміцнюючих фаз. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. No. 3(104). P.78-90 [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18983](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18983)
35. Sokolan I., Romanishina O., Sokolan K., Maidan P., Karazey V. Особливості підвищення зносостійкості деталей машин шляхом обробки концентрованим тепловим потоком. *Проблеми трибології*. 2023. 28(2/108). С. 37–43. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-37-43>
36. Smirnov I., Lopata A., Smirnova T., Lopata L. Improvement of functional properties of gas-thermal coatings by electro-contact treatment. *Problems of Tribology*. 2020. 25(1/95). P. 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-41-48>
37. Kuptsov K.A., Antonyuk M.N., Bondarev A.V. et al. Electrospark deposition of wear and corrosion resistant Ta(Zr)C-(Fe,Mo,Ni) coatings to protect stainless steel from tribocorrosion in seawater. *Wear*. 2021. Vol. 486–487. 204094 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204094>
38. Konoval V.P., Umanskii O.P., Panasyuk A.D., Lukyanchuk O.F. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. I. Mass transfer rate and coating composition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Vol.53. No.1–2. P.31–39. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9584-4>
39. Верхотуров А. Д., Муха И. М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. К.: Техніка, 1982. 181с.
40. Подчерняева И. А., Юречко Д. В., Панасюк А. Д., Тепленко М. А. Закономерности массопереноса и адгезионное взаимодействие при электроискровом легировании (ЭИЛ) сплава АЛ9 керамическими электродами AlN-Ti(Zr)B₂-Ti(Zr)Si₂. *Порошковая металлургия*. 2004. N9/10. С.43-50.

41. Konoval V.P., Umanskii O.P., Kostenko O.D., Martsenyuk I.S. Effect of the chemical composition of electrode materials and deposition parameters on the properties of electrospark-deposited coatings. II. Coating hardness and wear resistance. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Vol.53. No.3–4. P.210–218. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9606-2>
42. Storozhenko M., Umanskyi O., Tarelnyk V. *et al.* Structure and Wear Resistance of FeNiCrBSiC–MeB₂ Electrospark Coatings. *Powder Metall Met Ceram*. 2020. 59. P. 330–341. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00166-1>
43. Kandeava M., Kostadinov G., Penyashki T. *et al.* Abrasive Wear Resistance of Electrospark Coatings on Titanium Alloys. *Tribology in Industry*. 2022. Vol. 44, No. 1. P. 132–142. DOI: 10.24874/ti.1143.06.21.09
44. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. *Lubricants*. 2014. Vol.2. P.66–89. <https://doi.org/10.3390/lubricants2020066>
45. Niu J., Zhang L.-W., Zhang Q.-Z. *et al.* Microstructure of TiC Coating Deposited by Electric-spark Process on BT20 Titanium Alloy. *Heat Treatment of Metals*. 2006. Vol. 31, no. 4. P. 59-61.
46. Electro-Spark Deposition Applied to Metal Alloys [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=21579> – (дата звернення: 20.10.2023).
47. Penyashki T., Kamburov V., Kostadinov G. *et al.* Possibilities and Prospects for Improving the Tribological Properties of Titanium and Its Alloys by Electrospark Deposition. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2022. vol. 58, no 2. P. 135-146. DOI: 10.3103/S1068375522020090
48. Umanskyi O., Storozhenko M., Tarelnyk V. *et al.* Electrospark Deposition of FeNiCrBSiC–MeB₂ Coatings on Steel. *Powder Metall Met Ceram*. 2020. 59. P. 57–67. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00138-5>

49. Umanskyi O.P., Pareiko M.V., Storozhenko M.S. et al. Wetting and interfacial behavior of Fe-based self-fluxing alloy–refractory compound systems. *J. Superhard Mater.* 2017. 39. P. 99–105. <https://doi.org/10.3103/S1063457617020046>
50. Ahn Y.C., Chung Y.S. Numerical analysis of the electro-discharge machining process for alumina-titanium carbide composite II. unsteady state approach. *Korean J. Chem. Eng.* 2002. 19. P. 694–702. <https://doi.org/10.1007/BF02699320>
51. Подчерняева И. А., Панасюк А. Д., Щепетов В. В. и др. Поверхностное модифицирование сплава АЛ9 при электроискровом легировании материалами системы AlN-Ti(Zr)B₂-Ti(Zr)Si₂. *Порошковая металлургия*. 2004. № 3–4. С. 54–62
52. Завойко О.С. Теоретичні основи електротехнології зміцнення металів. Чернів. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича. - Чернівці: Рута, 2004. 124 с.
53. Zhengchuan, Z., Guanjuan, L., Konoplianchenko, I., Tarel'nyk, V. B., Zhiqin, G., & Xin, D. A review of the electro-spark deposition technology. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. 2 (44). P. 45-53. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.10>
54. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022. 12(10). 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536> .
55. Mao Y., Li Z., Feng K., Guo X., Zhou Z., Wu Y. Corrosion behavior of carbon film coated magnesium alloy with electroless plating nickel interlayer. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, 219, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.003>
56. Xiang H., Ke F., Tan Y.F., Wang X.L., Hua T. Effects of process parameters on microstructure and wear resistance of TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017, 27, 1767–1776. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60199-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60199-7)
57. Burakowski T., Wierzchoń W. Surface Engineering of Metals—Principle, Equipment, Technology. CRC Press; Boca Raton, FL, USA: 1999. 608с.
58. Gould J. Application of Electro-Spark Deposition as a Joining Technology. *Welding*

Journal. 2011. 90. P.191-197.

59. Leo P., Renna G., Casalino G. Study of the Direct Metal Deposition of AA2024 by ElectroSpark for Coating and Reparation Scopes. *Applied Sciences*. 2017. 7(9). 945. <https://doi.org/10.3390/app7090945>

60. Ebrahimnia M., Ghaini M.F., Xie Y.J., Shahverdi H. Microstructural characteristics of the built-up layer of a precipitation hardened nickel based superalloy by electrospark deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2014. 258. P. 515–523. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.045>

61. Radek N. Properties of the Electro-Spark Deposited Coatings - Technology and Applications. *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 818. P. 61-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.818.61>

62. Thamer A.D., Hafiz M.H., Mahdi B.S. Mechanism of Building-Up Deposited Layer during Electro-Spark Deposition. *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol*. 2012. 2. P. 258–263. <https://doi.org/10.4236/jsemt.2012.24039>

63. Młynarczyk P., Krajcarz D., Bańkowski D. The Selected Properties of the Micro Electrical Discharge Alloying Process Using Tungsten Electrode on Aluminum. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.104>

64. Cao G., Zhang X., Tang G., Ma X. Microstructure and Corrosion Behavior of Cr Coating on M50 Steel Fabricated by Electrospark Deposition. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. 28. P. 4086-4094. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04148-2>

65. Korkmaz K. Investigation and characterization of electrospark deposited chromium carbide-based coating on the steel. *Surface and Coatings Technology*. 2015. 272. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.033>

66. He F., Wang Z., Han B., Wu Q. et al. Solid solubility, precipitates, and stacking fault energy of micro-alloyed CoCrFeNi high entropy alloys. *Journal of alloys and compounds*. 2018. 769. P. 490-502. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.336>

67. Melnyk O., Onishchenko O., Kurdiuk S., Bulgakov M., et al. Pulse-Driven Surface Hardening and Advanced Electrospark Alloying for Maritime Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. 13(9). 1624. <https://doi.org/10.3390/jmse13091624>
68. Nikolenko S. V., Kuz'menko A. P., Timakov D. I., Abakymov P. V. Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. 47(3). P. 217-224. <https://doi.org/10.3103/S1068375511030057>
69. Penyashki T., Kostadinov G., Kandeva M. Improvement of Surface Properties of Carbon Steel Through Electrospark Coatings from Multicomponent Hard Alloys. *Materials*. 2025. 18(10), 2211. <https://doi.org/10.3390/ma18102211>
70. Manakova O. S., Kudryashov A. E., Levashov E. A. On the application of dispersion hardened SHS electrode materials based on (Ti, Zr) carbide using electrospark deposition. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. №51. P. 413–421. <https://doi.org/10.3103/S1068375515050117>
71. Teplenko M.A., Podchernyaeva I.A., Panasyuk A.D. Structure and wear resistance of coatings on titanium alloy and steels obtained by electro spark alloying with AlN–ZrB₂ material. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2002. 41. P. 154–161. <https://doi.org/10.1023/A:1019834910526>
72. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu, L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*. 2023. 13(8). 1473. <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>
73. Kuptsov K.A., Antonyuk M.N., Bondarev A.V., Sheveyko A.N., Shtansky D.V. Electrospark Deposition of Wear and Corrosion Resistant Ta(Zr)C–(Fe, Mo, Ni) Coatings to Protect Stainless Steel from Tribocorrosion in Seawater. *Wear*. 2021. 486–487. 204094 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204094>
74. Є.К. Солових, О.О. Мікосянчик, А.В. Рутковський та ін. Електроіскрові антифрикційні покриття на алюмінієвих сплавах для двигунобудування: монографія. Кропивницький: Центральноукраїнський національний технічний університет, 2024.

156 с. ISBN 978-617-8268-27-5 <https://opac.kntu.kr.ua/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=5>

75. Зміцнення деталей транспортних засобів електроіскровими покриттями : монографія / А. Є. Солових, О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов [та ін.], ЦНТУ, Кропивницький, 2025. 276 с.

76. Калініченко В, Марчук В, Денисенко М, Лабунець В, Загребельний В. Електроіскрові покриття для зміцнення різального інструменту. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. 3(72). С.40-45.

77. Antonyuk V.S., Soroka E.B., Lyashenko B.A. et al. Discontinuous coatings on cutting tools. *Strength Mater.* 2007. 39. P. 99–102. <https://doi.org/10.1007/s11223-007-0014-4>

78. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V. Upgrading of Pump and Compressor Rotor Shafts Using Combined Technology of Electroerosive Alloying. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 630. P. 397-412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.397>

79. Huang Q., Chen Z., Wei X., Wang L., Hou Z., Yang W. Effects of Pulse Energy on Microstructure and Properties of Mo₂FeB₂-based Cermet Coatings Prepared by Electro-spark Deposition. *China Surface Engineering*. 2017. 30(3). P. 89-96. <https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20170106002>

80. Kozak F. V., Prunko I. B., Fedenko V. Y., Gladun M. R. Optimization of the process of application of electrospark coatings when strengthening automotive parts of the “shaft” type. *Oil and Gas Power Engineering*. 2024. 2(40). P. 66–72. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-72)

81. Habibi F., Samadi A. In-situ formation of ultra-hard titanium-based composite coatings on carbon steel through electro-spark deposition in different gas media. *Surface and Coatings Technology*. 2024. Vol. 478. 130472 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130472>

82. Marchenko, D., Matvyeyeva, K. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology*. 2023. 28(1/107). P. 65–72. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-65-72>

83. Vakulenko I. O., Proydak S. V., Stradomski Z., Diadko V. A. Influence of electric spark on hardness of carbon steel. *Science and Transport Progress*. 2014. 2(50). P. 95–102. <https://doi.org/10.15802/stp2014/23779>

84. Mikosianchyk O., Tokaruk V., Mnatsakanov R. Estimation of tribotechnical characteristics and signals of acoustic emission for a friction pair of steel 30HGSA and duraluminium D16 modified by an alloy VK8. *Problems of Tribology*. 2019. 24(2/92). P. 48–54. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-48-54>

85. Клімчук В., Іванов В., Бутенко М. та ін. Оцінка ефективності доробок авіаційної техніки. *Повітряна міць України*. 2023. Т. 1, № 4. С. 63–66. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-63-66>

86. Коновал В.П. Стійкість до абразивного зношування композиційних матеріалів та покриттів на основі дибориду титану-хрому. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. 2015. № 1. С.25-30.

87. Zhengchuan Z., Guanjun L., Konoplianchenko I., et al. A review of the electro-spark deposition technology. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. 2 (44). P. 45-53. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.10>

88. Xu P., Wang Y., Cao X. et al. The tribological properties of DLC/SiC and DLC/Si₃N₄ under different relative humidity: The transition from abrasive wear to tribochemical reaction. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, Is. 3. P. 3901-3910. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.252>

89. Shepelenko I., Tsekhanov Y., Nemyrovskyi Y., Posviatenko E. Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Anti-friction Non-abrasive Treatment. In: Karabegović I. (eds) *New Technologies, Development and Application III*. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 128. Springer, Cham, 2020. P. 194–201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_22

90. Shepelenko I. Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of tribology*. 2021. 100, no. 2. P. 50–57. <http://dx.doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>
91. M. Salmaliyan, F. M. Ghaeni, M. Ebrahimnia Effect of electro spark deposition process parameters on WC-Co coating on H13 steel. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 321. P. 81-89 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.040>
92. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B. et al. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021. 57. P. 173–184. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
93. Agafii V., Mihailov V., Kazak N., Volodina G., Cracan C. Increase of wear resistance of Cr18Ni10Ti stainless steel by method of electric-spark alloying with electrodes of refractory metals and graphite. *Is part of BALTTTRIB' 2017 : proceedings of IX international scientific conference*, Aleksandras Stulginskis University, Kaunas, Lithuania, 16-17 November 2017. 2017. P. 53-56. <https://doi.org/10.15544/baltrib.2017.11>
94. Zubkov O. V. Determination of the influence of electro-spark alloying on the strength indicators of machine parts. Сучасні матеріали та технології їх обробки : зб. наук. пр. Міжнар. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 23–24 квіт. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2024. С. 31–37.
95. Bilous O., Mahura B. Application of wear-resistant coating by electrospark alloying method using an eutectic electrode material. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 2018. Vol. 4, No. 1, P. 40-48. <https://doi.org/10.23939/ujmems2018.01.040>
96. Penyashki T., Radev D., Kandeveva M., Kostadinov G. Structural and tribological properties of wear resistant coatings obtained by electrospark deposition. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 2020. 724. 012015. DOI: [10.1088/1757-899X/724/1/012015](https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012015)

97. Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. Триботехніка та основи надійності машин: Навчальний посібник. К.: Інформавтодор, 2006. 216 с.
98. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Харченко О.В., Ільїна О.А. Триботехніка та основи надійності машин: Практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії спеціальності 131 «Прикладна механіка». К.: НАУ, 2023. 96 с.
99. Lord J. K., Langton D. J., Nargol A. V. F., Joyce, T. J. Volumetric wear assessment of failed metal-on-metal hip resurfacing prostheses. *Wear*. 2011. 272(1). P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.07.009>
100. Chavanes A., Pauty E., Woydt M. Titanium-molybdenum carbonitride as light-weight and wear resistant monolithic material. *Wear*. 2004. 256(7-8). P. 647–656. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(03\)00513-1](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(03)00513-1)
101. Mazzucco D., Spector M. Effects of contact area and stress on the volumetric wear of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Wear*. 2003. 254(5-6). P. 514–522. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(03\)00135-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(03)00135-2)
102. Mohapatra G., Sahay S.S. Wear and tribology in agricultural machinery. *Friction, Lubrication, and Wear Technology*. 2017. Vol. 18. P. 984–1002. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v18.a0006386>
103. Bao H., Kong W., Hou X., Zhu R. Analysis on temperature field of friction pair of aviation friction clutch based on different groove shapes of friction disk. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. 35(8). P. 3735–3742. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0742-6>
104. Medvedev A., Bychkov V., Selivanov A. et al. Joining of Cu - Mg - Mn aluminum alloy with linear friction welding. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2014. 7(5). P. 43–46. <https://doi.org/10.25103/jestr.075.12>
105. Chang J., Wang Z., Zhu Q., Wang Z. SVR Prediction Algorithm for Crack Propagation of Aviation Aluminum Alloy. *Journal of Mathematics*. 2020. 1034639. 12 p. <https://doi.org/10.1155/2020/1034639>

106. Wanhill R., Windisch M. Corrosion and stress corrosion testing of aerospace vehicle structural alloys. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. 2018. P.1-16. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89530-7>

107. Liao P. Non-linear vibration and bifurcation analysis of Euler-Bernoulli beam under parametric excitation. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. 71. P. 85. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00420-y>

108. Yu W., Chen F., Li N. et al. Stability and bifurcation dynamics for a nonlinear controlled system subjected to parametric excitation. *Archive of Applied Mechanics*. 2017. 87. P. 479-487. <https://doi.org/10.1007/s00419-016-1205-x>

109. Aulin V.V., Hryniv A.V., Smal V.V. et. al. Basic approaches and requirements for the design of tribological polymer composite materials with high-modulus fillers. *Problems of Tribology*. 2021. V. 26, No 4/102. P. 51-60 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-102-4-51-60>

110. Dwyer-Joyce R.S. Predicting the abrasive wear of ball bearings by lubricant debris. *Wear*. 1999. Vol. 233-235. P. 692-701. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00184-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00184-2)

111. Al-Quraan T. M.A., Ilin O., Kulyk M. et. al. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. *Advances in Tribology*. 2023. Vol. 2023. Article ID 6676706. P. 13. <https://doi.org/10.1155/2023/6676706>

112. Панашенко В.М. Склад, структура і властивості електроіскрових і лазерно-електроіскрових ZrB₂-вмісних покриттів на титанових сплавах. *Електричні контакти та електроди*. 2014. № 12. С.134-143.

113. Скворцов О. О., Мікосянчик О. О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С. 64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)

114. Durdu S., Korkmaz K., Aktuğ S. L., Çakır A. Characterization and bioactivity of hydroxyapatite-based coatings formed on steel by electro-spark deposition and micro-arc oxidation. *Surface and Coatings Technology* 2017. Vol. 326, Part A. P. 111-120 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.039>

115. Abrasive Wear Test ASTM G65. URL: <https://extremecoatings.net/technical-resources/test-results/abrasive-wear-test-astm-g65/> (дата звернення: 14.09.2023).

116. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 3 «Вивчення приладів та техніки випробувань матеріалів на мікротвердість на приладі ПМТ-3» з дисципліни «Основи науководослідної роботи» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» всіх форм навчання / Укл: М.І. Андрущенко, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 26 с.

117. Borak K. Impact of the form factor of the abrasive particles of the soil on the intensity of the tilling machines tools wear. *Scientific Works of VNTU*. 2020. № 1. P. 1-10 <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2020-1-46-55>

118. Попов В.С., Брыков Н.Н., Металловедческие аспекты износостойкости сталей и сплавов. – 3.:ВПК «Запоріжжя», 1996. 180 с.

119. Єрко О. О., В. І. Копилов Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB₂. Інженерія поверхні. Комплексний підхід: Матеріали шостої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТОВ “Фастпринт”, 2018. С.5-6.

120. Бриков М.М., Єфременко В.Г., Єфременко О.В. Зносостійкість сталей та чавунів при абразивному зношуванні: Наукове видання. - Херсон: Гринь Д.С., 2014. - 364 с.

121. Чмелева В.С. Рабочая программа, методические указания и индивидуальные задания к изучению дисциплины «Легированные стали и специальные сплавы и их термическая обработка». Днепропетровск: НМетАУ, 2021. 56с.

122. Dvornik M., Mikhailenko E., Nikolenko S. et al. Production of ultrafine-grained spherical β -WC-W₂C-Co microparticles by electro discharge erosion of WC-15Co alloy in glycerol and their solutions. *Materials Research Express*. 2020. Vol. 7, 9. 7 096504 DOI 10.1088/2053-1591/abb0d6

123. Учитель А.Д., Малиновский Ю.А., Панченко А.Н. та ін. Обґрунтування впливу перехідних режимів на якість готових виробів при їх обробці методами

пластичного деформування з позиції хвильових та автоколивальних процесів. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2019. № 1-2. С.6-17. DOI 10.33101/s001-185980670

124. Nilsson R., Dwyer-Joyce R.S., Olofsson U. Abrasive Wear of Rolling Bearings by Lubricant Borne Particles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006. 220(5). P. 429-439. doi:[10.1243/13506501J00205](https://doi.org/10.1243/13506501J00205)

125. Ikhsan A., Gasni D., Rusli M. Wear Patterns on Ball Bearings Lubricated by Grease Contaminated with Several Large Solid Particles. *Tribology in Industry*. 2025. Vol. 47, No. 2. P. 202-216. DOI: 10.24874/ti.1893.02.25.04

126. Маліновський Ю. О., Власенков Д. П., Ситник С. А. та ін. Тракткування енергетичних методів у теорії тертя та зношування з позиції механіки суцільних середовищ та теорії дислокацій. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 4. С. 97-120. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18083](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18083)

127. Malinovskyi, Y., Mikosianchyk, O., Uchytel, O., et al. Dynamic processes in surface layers of parts as a source of their multicycle failure under friction and wear. *Problems of Tribology*. 2025. 30(3/117). С. 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-41-48>

128. Маліновський Ю. О., Дубровський С. С., Маліновська С. І. Деформаційно-хвильові ефекти при терті та зношуванні твердих тіл. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2017. № 2. С. 66-71.

129. Cunningham W. J. Introduction to Nonlinear Analysis. New York : McGraw-Hill, 1958. 303 p.

130. Учитель А. Д., Маліновський Ю. О., Панченко А. Н. та ін. Передумови виникнення автоколивальних і хвильових процесів у формоутворювальних машинах під час обробки заготовок і деталей методом пластичного деформування. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 6. С. 21-29. DOI: 10.33101/S063456734

131. Учитель О. Д., Маліновський Ю. О., Даниліна Г. В. та ін. Вплив параметричного резонансу на механізм руйнування контактуючих поверхонь при терті

та зношуванні. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 4. С. 65-73. DOI:10.33101/S05-48574363

132. Coronado J.J., Sinatora A. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 2. *Wear*. 2011. Vol. 271, Is. 9-10. P. 1804-1812 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.036>

133. Sevim I., Eryurek I. B. Effect of abrasive particle size on wear resistance in steels. *Materials & Design*. 2006. Vol. 27, Is. 3. P. 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.10.010>

134. Rutherford K.L., Hutchings I.M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. *Surface and Coatings Technology*. 1996. Vol. 79, Is. 1-3. P. 231-239. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)

135. Hokkirigawa K., Kato K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribology International*. 1988. Vol. 21, Is. 1. P. 51-57. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(88\)90128-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(88)90128-4)

136. Correa, E., Alcântara, N., Tecco, D. *et al.* The Relationship between the Microstructure and Abrasive Resistance of a Hardfacing Alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V System. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007. 38. P. 1671-1680. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9220-8>

137. Gahr K.-H. Z. *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier, 1 de mar. de 1987. 559 p.

138. Adachi K., Hutchings I.M. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. *Wear*. 2003. Vol. 255 (1-6). P. 23-29. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00073-5)

139. Sorour A. A. Fe-Cr-B-based wear-resistant alloys – A review on microstructure and tribological properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 33. P. 7888-7901. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.143>

140. Sukhova O. V. Formation of Structure and Properties of Boron-Rich Fe-B-C Alloys Alloyed with Cr, V, Nb or/and Mo. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2021. vol. 43, No. 3. P. 355-365 <https://doi.org/10.15407/mfint.43.03.0355>

141. Liu J., Chen W. Microstructure and mechanical properties of a spark plasma sintered Fe-11Cr-2.3B-6Al-15Mn alloy. *Vacuum*. 2018. Vol. 150. P. 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.01.029>

142. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V. et al. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. 40, No. 6. P. 795-815. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.06.0795>

143. Joo Y.-A., Yoon T.-S., Park S.-H., Lee K.-A. Microstructure and Compression Properties of Fe-Cr-B Alloy Manufactured using Laser Metal Deposition. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. 63, 3. P. 1459-1462. DOI: [10.24425/123828](https://doi.org/10.24425/123828)

144. Gou J., Wang Y., Zhang Y. et al. Dry sliding wear behavior of Fe–Cr–C–B hardfacing alloy modified with nano-CeO₂ and its mechanisms of modification. *Wear*. 2021. Vol. 484–485. 203756. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203756>

145. Guo J., Liu Z. Su Y. Effect of b on microstructure and properties of surfacing layer of austenitic stainless steel flux cored wire. *Materials*. 2022. 15(17). 5884. <https://doi.org/10.3390/ma15175884>

ДОДАТКИ

А. Список публікацій за темою дисертації.

Б. Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

Список публікацій за темою дисертації.**У фахових виданнях категорії Б:**

1. **Skvortsov O.O.**, Mikosianchyk O.O. Estimation of tribo-technical parameters of composite polymer with metal filler. *Problems of Tribology*. 2022. V. 27, No 2/104. P.42-48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-42-48>
2. Медюх Р.М., Медюх В.К., Присяжнюк В.В., Лабунець В.Ф., **Скворцов О.О.** Дослідження структури та трибологічних властивостей композиційного плазмового покриття на основі сталі. *Вісник вінницького політехнічного інституту*. 2023. 4 (169). С. 54-60. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-54-60>
3. **Скворцов О.О.**, Мікосянчик О.О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С. 64-72. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895)
4. **Скворцов О.О.**, Мікосянчик О.О. Залежність зносостійкості електроіскрових покриттів в абразивному середовищі від зміцнюючих фаз. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. 3 (104). С.78-90. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18983](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18983)
5. Mikosianchyk O.O., **Skvortsov O.O.**, A. O. Kornienko Improving the wear resistance of structural steels by electrospark deposition. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 2 (107). С. 40-47. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(107\).20145](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(107).20145)
6. Malinovskiy Y., Mikosianchyk O., Uchytel O., **Skvortsov O.** et all. Dynamic processes in surface layers of parts as a source of their multicycle failure under friction and wear. *Problems of Tribology*. 2025. 30(3/117). P. 41–48. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-41-48>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Литвиненко В.А., **Скворцов О.О.**, Мікосянчик О.О. Оцінка якості композиційного матеріалу критерієм міцності. *Безпека в авіації та космічні технології: матеріали X Всесвітнього конгресу “Авіація в ХХІ столітті”*, м. Київ, 28-30 вересня 2022

р., 2022. С. 1.3.5-1.3.8.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8517/7013>

8. Бородій В.М., **Скворцов О.О.**, Ільїна О.А. Оцінка елестогідродинамічних показників зубчастої передачі героторного масляного насосу. *Безпека в авіації та космічні технології*: матеріали X Всесвітнього конгресу “Авіація в XXI столітті”, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р., Київ, 2022. Р.1.3.27-1.3.30.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8867/7018>

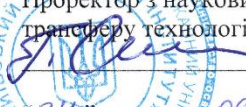
9. **Скворцов О.О.** Зносостійкі новітні матеріали електродів для електроіскрових покриттів. *«ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки»*: XXIV Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, м.Київ, 2-5 квітня 2024 р., Київ, 2024. С. 131-132.

https://aki.nau.edu.ua/wp-content/uploads/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%8224_%D0%90%D0%9A%D0%A4.pdf

10. **Скворцов О.О.** Моделювання процесу зношування вузлів тертя авіаційної техніки. *«Політ. Сучасні проблеми науки»*: XXV Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених”, м. Київ, 1-4 квітня 2025 р., Київ, 2025. С.52-54.

https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025_AKF.pdf

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукових досліджень та
трансферу технологій

Сергій ГНАТЮК
29 09 2025 року

АКТ

Комісія у складі:

голови

– завідувача кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, д.т.н.,
професора Мікосянчик Оксани Олександрівни;

членів комісії:

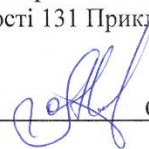
– доцента кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, к.т.н.,
доцента Башти Олександра Васильовича;
– доцента кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, к.т.н.,
доцента Шевченка Олега Анатолійовича

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Державний університет «Київський авіаційний інститут» Сковрцова Олександра Олексійовича на тему: «Підвищення зносостійкості елементів трибоспряження в абразивному середовищі нанесенням композиційних покриттів» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка впроваджені в навчальний процес Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Зокрема, у процесі підготовки курсів лекцій та практичних занять з дисциплін «Основи надійності машин та механізмів» та «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» розглянуто сучасні електроди на основі зносостійких композиційних матеріалів та метод електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; підготовки тем кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 131 Прикладна механіка.

Голова комісії

доктор технічних наук, професор

 Оксана МІКОСЯНЧИК

Члени комісії

кандидат технічних наук, доцент

 Олександр БАШТА

кандидат технічних наук, доцент

 Олег ШЕВЧЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний конструктор з силових установок
та систем життєзабезпечення

АТ «АНТОНОВ»

м. Київ, Україна

Вячеслав УСЕНКО

09 грудня 2025 року

про реалізацію результатів наукових досліджень

Скворцова Олександра Олексійовича

Результати наукових досліджень, які отримані особисто аспірантом кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Державного університету «Київський авіаційний інститут» Скворцовим Олександром Олексійовичем, були реалізовані в технології електроіскрового легування конструкційних сталей зносостійкими покриттями та можуть бути рекомендовані до стендових випробувань на АТ «АНТОНОВ» при відновленні та підвищенні строку служби деталей авіаційної техніки.

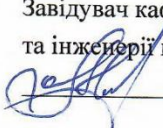
Запропоновані аспірантом Скворцовим О.О. технології електроіскрового легування та технологічні інструкції по підвищенню зносостійкості пар тертя авіаційної техніки, а також по відновленню фізико-механічних та міцнісних характеристик інтенсивно навантажених деталей авіаційної техніки дозволили підвищити строк служби деталей та продовжити термін їх використання за рахунок управління структурними ефектами та фазовим складом поверхневих модифікованих шарів конструкційних сталей нанесенням електроіскрових покриттів з необхідним рівнем триботехнічних властивостей.

Лабораторні випробування абразивної стійкості електроіскрових покриттів показали, що відновлення елементів стійок шасі дозволило підвищити їх строк служби в 2...2,5 рази.

Використання деталей авіаційної техніки, які виготовлені з конструкційної легованої сталі 30ХГСА та конструкційних вуглецевих сталей 30 та 45 зі зносостійкими електроіскровими покриттями з сталі Р18 та сплаву ВК8 свідчить про підвищення їх експлуатаційних характеристик за рахунок підвищення на 50% поверхневої твердості та зносостійкості шляхом формування електроіскрових покриттів сталей з підвищеним вмістом карбідів.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Представники
Державного університету
«Київський авіаційний інститут»

Завідувач кафедри прикладної механіки
та інженерії матеріалів д.т.н., професор
 Оксана МІКОСЯНЧИК

Аспірант кафедри прикладної механіки
та інженерії матеріалів
 Олександр СКВОРЦОВ

Представники
Акціонерного товариства «АНТОНОВ»

Провідний інженер-конструктор КВ-4
 Олександр ПОЛІЩУК

Інженер-конструктор 2 категорії КВ-17
 Катерина ЧАВА